

Heinrich Arnold

**Robert Döpel und sein Modell der globalen
Erwärmung**

Robert Döpel und sein Modell der globalen Erwärmung

Eine frühe Warnung – und die
Aktualisierung

Von Heinrich Arnold



Universitätsverlag Ilmenau
2009

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-939473-50-3 (Druckausgabe)

urn:nbn:de:gbv:ilm1-2009100044

„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.“

ALBERT EINSTEIN

Dieses Motto der WEIMARER REDEN 2008, die im Deutschen Nationaltheater unter dem Generalthema „Zukunft anddenken“ gehaltenen wurden, griff die Journalistin

GABRIELE KRONE-SCHMALZ, Mitglied des Hochschulrates der TU Ilmenau, in der Einleitung ihrer Rede so auf:

„Auch wenn ich mich nicht erdreiste Albert Einstein zu widersprechen ..., ein kleines 'Aber' hätte ich schon. Und zwar in dem Sinne, dass man Vergangenes kennen muss, um Gegenwärtiges zu begreifen, damit das Fundament für die Gestaltung der Zukunft möglichst stabil ist.“

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Übersicht	9
2	Fakten und Diskussionen zur globalen Erwärmung	13
3	ROBERT DÖPEL, sein Klimamodell und die Aktualisierung	21
3.1	Wichtige Lebensstationen und Arbeiten DÖPELS	21
3.2	Die DÖPELschen Modellrechnungen und ihre Aktualisierung	26
3.3	Das Forcing-Konzept und die Sonne	41
3.4	Einbeziehung des anthropogenen Treibhaus-Effekts	44
4	Schlussbetrachtungen	57
4.1	Kernenergie?	57
4.2	Der Klimawandel und die „andere Kultur“	61
5	Zusammenfassung	67
6	Dank	71

1 Einleitung und Übersicht

„An Inconvenient Truth - A Global Warning“ lautet der Titel eines Films von AL GORE [1], dem unermüdlichen Warner und daher Mitempfänger des Friedensnobelpreises 2007 (zur Hälfte). Die Verleihung dieser Auszeichnung hat mit der neuerlichen Konvergenz der Auffassungen unter dem Eindruck bedrohlicher Fakten zum Klimawandel zu tun. Dazu hat der andere Preisträger, der UN-Klimarat IPCC (*International Panel on Climate Change*) mit seinen mehreren Hundert unmittelbaren und weit mehr indirekt beteiligten Mitarbeitern, 2007 den 4. seiner Berichte¹ vorgelegt. Damit hat er wieder entscheidend zu einem politisch belastbaren Konsens über die globale Erwärmung und ihre Minderung beigetragen. Die koordinierte wissenschaftliche Arbeit dieses Gremiums ist nach Art und Umfang bisher einmalig, was auch Probleme mit sich bringt. Allein der für unsere Modellbetrachtungen wichtigste Teilbericht der Arbeitsgruppe I von 2007 [2] umfasst nahezu 1000 Seiten.

Bei den jahrelang vorherrschenden (und noch nicht beendeten) Kontroversen zur globalen Erwärmung durch den Treibhauseffekt sind frühzeitige Warnungen wenig beachtet worden. Dazu gehören diejenigen des Physikers ROBERT DÖPEL (1895-1982) aus dem Jahr 1973 [3], die er durch erste Modellrechnungen untermauert hat. Seine bestechend einfache Analyse berücksichtigt allerdings noch nicht die Zunahme des Treibhauseffektes, sondern lediglich die „industrielle Energieerzeugung“ im weiteren Sinne, d. h. die anthropogene Abwärme.

¹Den Hauptteil dieser *Assessment Reports* [2] bilden jeweils die Teilberichte dreier Arbeitsgruppen (Working Groups WG I-III) über „wissenschaftliche Grundlagen“, „mögliche Auswirkungen“ sowie „Gegenmaßnahmen“. Vorangestellt werden *Synthesis Reports* (SYR), *Technical Summaries* (TS) und *Summaries for Policymakers* (SPM). Eine solche „Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger“ ist für die WG I auf deutsch unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tranlations.htm> abrufbar. - Eine Übersicht zu [2-2007] einschließlich eines (2.) Abschnitts „Kritik“ bietet <http://www.wikipedia.de> unter „IPCC“.

Deren Auswirkungen sind bei Fortsetzung des seither eingetretenen Wachstums (ca. 2% pro Jahr) erst ab dem Ende des nächsten Jahrhunderts zu erwarten. Die verstärkte Sensibilität für Klimafragen lässt aber jetzt auf Offenheit auch für solche Überlegungen mit einem Zeit- und Verantwortungshorizont von Jahrhunderten hoffen. Bisher stehen vor allem die nächsten Jahrzehnte (oft ohne Berücksichtigung von Spätfolgen) zur Debatte – oder im anderen Extrem $10^4 - 10^6$ Jahre bei der Entsorgung radioaktiver Abfälle.

Zur besseren Einordnung der Modelle von ROBERT DÖPEL und seinen Nachfolgern werden zunächst im Abschnitt 2, der auch unabhängig von den späteren Rechnungen gelesen werden kann, einige wichtige Etappen auf dem Wege zum aktuellen Diskussionsstand über den Klimawandel betrachtet. Dieser wird vor allem mit Blick auf die Aktualisierung des DÖPEL-Modells dargestellt. Länger zurückliegendes, das die Jüngeren nicht miterlebt und die Älteren oft schon vergessen haben², wird besonders kritisch und ausführlich behandelt, zumal es noch wenig durch die elektronischen Medien erschlossen wurde.

Letzteres gilt auch für das Wirken DÖPELS, das in dieser Abhandlung - besonders im Abschnitt 3.1 - beginnend bei seiner ersten Professur und mit Blick auf seine Bedeutung für die TU Ilmenau als seiner letzten Lebensstation gewürdigt wird. Seine wichtigste frühere Leistung auf experimentalphysikalischem Gebiet, die am Anfang der Kerntechnik stand, erbrachte er zusammen mit seiner Frau und mit WERNER HEISENBERG als Theoretiker [3a] in Leipzig. Dort erschien zur 100. Wiederkehr des Geburtstags von ROBERT

²Ein Beispiel ist die Ozonschicht-Zerstörung durch Fluorchlorkohlenwasserstoffe, deren atmosphärische Konzentration Mitte der 1990er Jahre kulminierte und dann reduziert wurde. Dazu sagte P. Crutzen, der 1995 in diesem Zusammenhang mit dem Chemie-Nobelpreis ausgezeichnet worden war, 2007 in einem Interview: „*Wie knapp es damals war, ist der Mehrheit der Menschen kaum präsent.*“ Auf die anschließende Frage: „*Kann sich die Menschheit noch einmal auf so viel Glück verlassen?*“ lautete die Antwort: „*Beim Klimawandel bestimmt nicht.*“ („Die taz“ 13.09.2007. Das Interview kann bei <http://www.wikipedia.de> unter „Ozonloch“ abgerufen werden.) – Mehr zum Ozonloch folgt in Zusammenhang mit dem Treibhauseffekt im Abschnitt 2.

DÖPEL eine Sonderschrift [4], in der auch seine Zeit in Ilmenau ausführlich dargestellt ist. Hier entstand sein geophysikalisches Modell [3], das im Abschnitt 3.2 zusammen mit aktualisierten Rechnungen beschrieben wird.

Deren Aussagen werden nach Verallgemeinerung (in 3.3) gemeinsam mit aktuellen Literatur-Ergebnissen von Computersimulationen zum anthropogenen Treibhauseffekt diskutiert (in 3.4). Dieser ist gegenwärtig weit gravierender, kann aber wegen seiner Komplexität hier nur stark vereinfacht behandelt werden. Dabei werden Einsichten in die Klimaproblematik mit den dabei gängigen Begriffen und Größen vermittelt, die zum geophysikalischen und klimatologischen Grundwissen gehören. Im Nachhinein erweist sich DÖPELS Konzept als ein Sonderfall der international weit verbreiteten Zurückführung globaler Temperaturänderungen auf das (radiative) Forcing³, eine Art Triebkraft für die anthropogene Erwärmung.

Die mathematisch-naturwissenschaftlichen Anforderungen der quantitativen Behandlung überschreiten diejenigen an (werdende) Abiturienten nicht⁴. Die Modellbetrachtungen in den Abschnitten 3.2 - 3.4, zu denen auch eine englische Kurzdarstellung in der *Digitalen Bibliothek Thüringen* erschienen ist⁵, sind besonders für die „MINT-Fächler“ aus Mathematik, Informatik, Natur- und Technikwissenschaften gedacht⁶.

³Englisch auch *climate forcing*; hier kurz Forcing, entsprechend dem „Strahlungsantrieb“ z.B. aus IPCC-Übersetzungen (Fußn. 1). Bei Verwechslungsgefahr mit der „Forcing-Methode“ aus der Mengenlehre kann auch „Klima-Forcing“ verwendet werden.

⁴Die Darstellung beruht auf Erfahrungen, die der Autor an der Technischen Hochschule bzw. (seit 1992) Universität Ilmenau von 1978 bis 1999 hauptsächlich mit Ingenieurstudenten - auch Studienanfängern - und zuletzt im einwöchigen „*Ilmenauer Physiksommer 2008: Energie und Klima*“ für ausgewählte Oberstufenschüler gemacht hat. Alljährlich wird das Thema den TU-Studierenden der „*Technischen Physik*“ im Proseminar geboten.

⁵*Global Warming by Anthropogenic Heat Release*; <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12474>.

⁶Die Abkürzung MINT, die auch im Hochschulwesen gebräuchlich ist, entstammt dem deutschen gymnasialen Bereich mit <http://www.mint-ev.de>.

Die Ergebnisse und ihre Gegenüberstellung mit längerfristigen Klima-Szenarien aus der aktuellen Literatur zeigen, dass mit einer Beendigung der Treibhausgasemissionen noch keine nachhaltige Energieerzeugung verbunden wäre, zumal die vorgesehenen Fusionskraftwerke weitere Abwärme produzieren würden. Das Verständnis der hierzu grundlegenden Abbildung 2 (Abschnitt 3.2) erfordert keine eingehende Kenntnis der Rechnungen, auf denen sie basiert.

Der abschließende, wieder rein verbale Abschnitt 4 bringt zunächst Folgerungen zur Kerntechnik. Danach wird (in 4.2), ebenfalls an die Arbeit [3] anknüpfend, auf gesellschaftliche und kulturelle Aspekte der Klimadebatte eingegangen, soweit sie nicht bereits in den Abschnitt 2 einbezogen werden. Dieser kann - ebenso wie der mehr biographische Abschnitt 3.1 - vom eiligen Leser übersprungen werden, wenn sich das Hauptinteresse auf quantitative Betrachtungen richtet. Umgekehrt können die Abschnitte 3.2 - 3.4 bei Desinteresse an solchen Betrachtungen ausgelassen werden. - Die Abfolge der Abschnitte wurde so gewählt, dass nicht nur die Modellrechnungen DÖPELS aus heutiger Sicht, sondern auch seine Persönlichkeit sowie Umstände und Vorgeschichte seines Wirkens in Ilmenau deutlich werden.

Eine wissenschaftsjournalistische, mit guten Begriffserläuterungen versehene Darstellung zum erweiterten historischen Hintergrund des folgenden Abschnitts 2 zur Klima-Debatte bietet das Taschenbuch [5].

2 Fakten und Diskussionen zur globalen Erwärmung

JEAN-BAPTISTE FOURIER hat den globalen Treibhauseffekt bereits 1822 bei seinen grundlegenden Arbeiten zur Wärmelehre als „l’effet de serre“ beschrieben⁷ oder, wie es Gassmann [7] formuliert, „vermutet“. Nach weiteren Vorläufern⁸ lieferte der Schwede ARRHENIUS ab 1896 die bahnbrechenden Erkenntnisse. Die atmosphärische „Weltmitteltemperatur“ an der Erdoberfläche⁹ wäre ohne den atmosphärischen Wärmestau der von der Sonne beschienenen Erde weit niedriger (s. Abschnitt 3.2). Er beruht auf der Absorption der abgestrahlten Wärme durch Wolken, Wasserdampf, Kohlendioxid und weitere Spurengase. Diese atmosphärischen Absorber übernehmen die Rolle eines Glasdachs, wobei ist die Ähnlichkeit mit den Verhältnissen im Gewächshaus natürlich recht begrenzt ist [9].

SVANTE ARRHENIUS (Chemie-Nobelpreis 1903) erkannte auch das anthropogene Verstärkungspotential für den Treibhauseffekt und sagte 1904 über die Kohlendioxid-Zunahme, die er allerdings erst nach einigen Jahrhunderten als merklich erwartete [8]:

„Sie wird es unseren Nachfahren ... erlauben, unter einem wärmeren Himmel zu leben - in einer weniger rauen Umwelt, als sie uns beschieden.“

⁷Das Handbuch der Physik von 1957 [6], auf das sich DÖPEL [3] bezieht, spricht von „*Glashauswirkung*“ bzw. vom „*greenhouse effect*“ . - Letzterer wird in US-amerikanischen Umweltdebatten einem „*White House effect*“ gegenübergestellt, der auf die globale Temperatur gegenläufig oder auch in die gleiche Richtung wirkt, je nach Besetzung dieses Hauses.

⁸Eine ausführlich kommentierte Chronologie zur Literatur über den Treibhauseffekt bietet Wisniak [8].

⁹Für diese mittlere Globaltemperatur verwendete er, wie auch heute üblich, 15⁰C [9]. Nach [10a] werden 14,5⁰C im Jahr 2010 überschritten werden.

Mit diesen Worten, die heute als öko-optimistisch gelten könnten, wenn sie nicht die unter einem anderen Himmel Lebenden außer Acht gelassen hätten, war die Debatte um die globale Erwärmung durch den Menschen eröffnet.

Die breite Öffentlichkeit und auch große Teile der Fachwelt nahmen jedoch von der Erhöhung der Kohlendioxid-Konzentration (Abb. 1b) als möglicher Ursache einer globalen Erwärmung (Abb. 1a) bis in die 1970er Jahre hinein kaum Notiz. Im ersten Bericht an den Club of Rome von 1972 [11] wurde unter den wachstumsbegrenzenden globalen Problemen die anthropogene Klimaänderung überhaupt nicht erwähnt, während der zweite Bericht von 1974 [12] im Epilog die Zunahme des Kohlendioxids und auch der industriellen Energieerzeugung mit der Erwartung einer allmählichen Erwärmung verbindet¹⁰. Vor beiden Einflüssen wurde auch in kurz darauf erschienenen populärwissenschaftlichen Schriften [13] gewarnt. Angesichts der damaligen Zunahme der Energieerzeugung um jährlich 6% wurden deutliche Klima-Änderungen „in ein- bis zweihundert Jahren“ prognostiziert.

In einem Bericht der 1974er Pugwash-Konferenz über „Weltprobleme und Wissenschaft“ [13a] werden¹¹

*„merkbare **regionale** oder **lokale** Klimastörungen ... infolge von Kombinationseffekten von Kohlendioxid- und Staubeilchenemissionen“* erwähnt, die beträchtlich früher eintreten könnten als *„eine tief greifende Störung des Weltklimas durch die an die Umwelt abgegebene Wärme“* infolge der menschlichen Energieerzeugung. Dies *„ist vermutlich erst beim 50- bis 100-fachen des gegenwärtigen Energieverbrauchs zu erwarten (das entspricht grob 80 bis 100 Jahren bei 5% jährlichem Wachstum).“*

¹⁰Die Autoren des 1. Berichtes haben auch in ihrem Buch von 1992 und im „Update“ von 2006 [12a] eine Erwärmung durch Energieerzeugung nicht erwähnt. Dagegen wurde nun die CO₂-Problematik bei den Wachstumsgrenzen unter Berufung auf die IPCC-Berichte [2] eingehend diskutiert.

¹¹Fettdruck im Original

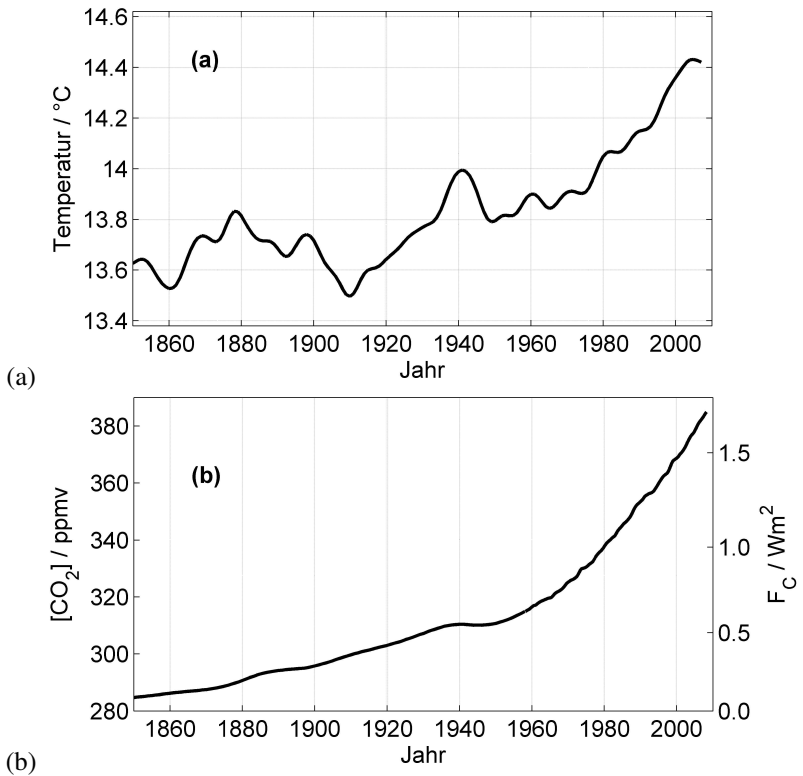


Abbildung 1: **(a)** Zeitverlauf der mittleren globalen Oberflächentemperatur der Atmosphäre (nach Daten aus [10a]).

(b) Zeitverlauf der mittleren globalen CO_2 -Konzentration in $ppmv = parts\ per\ million\ by\ volume$, also Volumenteilen auf eine Million (nach Daten aus [10b]).

Zusätzlich auf der Ordinate rechts das CO_2 - Forcing F_c als logarithmisches Maß für das Verhältnis der aktuellen Konzentration zum „vorindustriellen“ Wert 280 ppmv von 1750 [2], berechnet nach Gl. (15) aus Abschnitt 3.4.

Über derartige Aussagen hinaus können die danach zu erwartenden Temperatursteigerungen mit dem weiter unten zu behandelnden DÖPEL-Modell von 1973 [3] abgeschätzt werden. Auf der im Abschnitt 3.2 wiedergegebenen Grundlage resultieren im Beispiel einige Zehntelgrad für die zweite Hälfte unseres Jahrhunderts¹². Um sich davon beeindrucken zu lassen, hätte es des Naturells eines Forstwirts bedurft, der mehrere Generationen vorausschaut, wie das die alte, ursprünglich forstwirtschaftliche Forderung der Nachhaltigkeit beinhaltet. Ähnlich ist der Zeithorizont für eine Energieproduktion durch Kernfusion (Abschnitt 4.1).

Deren Förderer gehörten mit zur Zielgruppe der - bisher kaum zur Kenntnis genommenen - Warnungen ROBERT DÖPELS. Umgekehrt hat er die Verstärkung des Treibhauseffektes völlig außer Acht gelassen, die inzwischen als hauptverantwortlich für die globale Erwärmung erkannt worden ist. Diese beträgt seit 1750 etwa 0.8 K [2].

Allerdings war der Temperaturverlauf keineswegs so monoton wie bei der Konzentration des Kohlendioxids, was Abb. 1 illustriert. Das CO_2 ist zwar für die derzeitige Zunahme der Temperatur ausschlaggebend, und auch die beiden Langzeittrends zumindest der vergangenen 10^5 Jahre verlaufen weitgehend parallel ([1]; [7], Abb. 9). Jedoch wurde beispielsweise zwischen dem Anfang der 1940er und der Mitte der 1970er Jahre das „*global warming*“ sogar durch ein „*cooling*“ [2-1990] unterbrochen, das besonders gegen Ende dieses Zeitraums, als DÖPEL seine Arbeit [3] schrieb, zu kontroversen Debatten führte, die er wohlweislich ignorierte.

¹²Dies ist aus DÖPELS Bild 1 für den jährlichen Steigerungskoeffizienten der anthropogenen Abwärme $q = 1.05$ abzulesen. Aus der aktualisierten Abbildung 2c in unserem Abschnitt 3.2 ergibt sich Ähnliches, obgleich dort für die Jahre 1970-2000 das reale $q = 1.02$, also 2% statt 5% Steigerung pro Jahr zugrunde liegen. - Mit einer Beibehaltung dieser geringeren Steigerung wären nach diesem Modell erst am Anfang des übernächsten Jahrhunderts einige Zehntelgrad Temperaturerhöhung zu erwarten.

Als Hauptursachen sind Luftverschmutzungen durch Aerosole (s. Abschnitt 3.4) sowie vulkanische Einflüsse ([2], Fig. 9.5) anzusehen, ohne die heute eine deutlich stärkere Erwärmung vorläge.

Die Vermutung einer globalen Gefahr für das Klima führte schließlich die Vereinten Nationen zusammen mit der *World Meteorological Organization* (WMO) 1988 zur Bildung des eingangs erwähnten IPCC. Bereits im 1. Bericht [2-1990] wurde die atmosphärische Zunahme der Treibhausgase als anthropogen und alarmierend charakterisiert. Zum Vorbild für Konsequenzen hätte der internationale und sehr erfolgreiche Kampf gegen das 1984 entdeckte Ozonloch¹³ dienen können. Bereits 1987 wurde dazu das Protokoll von Montreal als das erste globale Umweltabkommen überhaupt beschlossen, das der Friedensnobelpreisträger und UN-Generalsekretär (1997-2006) KOFI ANNAN als das „bis heute vielleicht erfolgreichste internationale Abkommen“ pries. Zusammen mit den Folge-Abkommen bremste es nicht nur die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht, deren Erholung sich bereits abzeichnet und in der zweiten Hälfte unseres Jahrhunderts vollständig sein könnte [16]. Im „Update“ der „Grenzen des Wachstums“ [12a] wird die „Ozon-Story“ unter der Überschrift „Zurück hinter die Grenze“ als klassisches Beispiel für eine Grenzüberschreitung mit der Gefahr des Kollabierens und deren Abwendung geschildert. Beim Treibhauseffekt zeichnet sich inzwischen ebenfalls eine Grenzüberschreitung ab (Abschnitt 3.4), deren Reduzierung die aktuelle Hauptaufgabe der Klimapolitik ist.

Da die Halogenkohlenwasserstoffe, die das Ozonloch verursachen, zugleich stark wirkende Treibhausgase sind¹⁴, wurde durch ihre Verminderung die glo-

¹³Siehe hierzu Fußn. 2 und, auch zur Historie, [14] mit den Abschnitten 1.4.2, 2.1.3 und 2.2.

¹⁴Dies gilt auch für die Fluor-Kohlenwasserstoffe, die z. B. in der Kältetechnik nach dem Verbot der Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe eingeführt wurden und die in der EU seit 2006 der „F-Gase-Verordnung“ zur Leck-Prüfung und -Vermeidung an Kälteanlagen unterliegen. (Ein Verwendungsverbot soll erst 2011 erwogen werden.) Ganz ohne Halogenkohlenwasserstoffe kommt die bereits 1993 kreierte *Greenfreeze*-Kältetechnik [15] aus, die sich weltweit immer stärker verbreitet und künftig auch in den USA als letztem Industrieland eingeführt wird.

bale Erwärmung erheblich verzögert¹⁵. Nach neuen Berechnungen aus dem niederländischen Umweltzentrum MNP (Milieu en Natuur Planbureau) [17] kompensierte dies ein Jahrzehnt der aktuellen Kohlendioxid-Zunahme. Das übertrifft bei weitem die künftige Konsequenz der Verpflichtung von Industriestaaten im 1997er Protokoll von Kyoto, ihre Emissionen von Treibhausgasen von 2008 bis 2012 um durchschnittlich 5,2 % zu senken (bezogen auf das Niveau von 1990).

Dieser (zu) niedrige Wert wurde nicht zuletzt durch die Verhandlungsführung der USA verursacht, die beim Vizepräsidenten GORE lag¹⁶. Daraufhin (nach der Abgabe dieses Amtes) angesprochen, verwies er auf die realen Machtverhältnisse im Staate, in dem er „*nur der zweite Mann*“ gewesen sei [18]. Dies erinnert fatal an die Begründung des sowjetischen Verhandlungsführers in Montreal 1987, mit der er das Ozonabkommen in letzter Minute fast zum Scheitern gebracht hätte: Die Produktionsziffern der UdSSR für Halogenkohlenwasserstoffe seien bis 1990 im 5-Jahrplan festgeschrieben, und der dürfe laut Verfassung nicht geändert werden [19]. Dieses Problem konnte, letztlich dank GORBATSCHOW, mit Ausnahmeklauseln gelöst werden, während das CO₂- Problem wirtschaftlich und machtpolitisch ungleich größere Dimensionen hat und auch naturwissenschaftlich weit komplexer ist, was zu anhaltenden Auseinandersetzungen führte.

Zudem ließ die veränderte Weltlage in den 1990er Jahren verstärkte Forderungen zur Reduzierung der Ausgaben für den Umweltschutz aufkommen [20], während die Erkenntnis, dass verspätetes Reagieren zu höheren Kosten führt, noch zurückgedrängt wurde. Im Vorwort zum „*Update*“ der „*Grenzen des Wachstums*“ [12a] illustriert dies eine Gegenüberstellung des Welt-

¹⁵Umgekehrt existieren auch Auswirkungen dieses Effektes auf das Ozonloch, die jedoch noch unsicher sind [16].

¹⁶Präsident George Bush senior hat AL GORE 1992 im Wahlkampf als „*Ozone Man*“ attackiert, und sein Sohn wiederholte dies im Jahr 2000 [18]. Diese Bezeichnung wurde von GORE-Anhängern in einen Ehrentitel umgemünzt.

umweltgipfels in Rio de Janeiro 1992 mit der „Rio+10-Konferenz“ 2002 in Johannesburg sowie der zwischenzeitliche Verlauf der Grenzüberschreitung (Abbildung V-1). Symptomatisch ist die Formulierung aus dem Vorwort einer Sammlung so genannter Öko-Irrtümer von 1997 [21]:

„Die erste Welle des Umweltschutzes hat viel erreicht. Aber sie ist unwiederbringlich vorbei.“

Um letzteres zu beweisen, listen die Autoren dieses mehrfach wieder aufgelegten Bestsellers mit großer Ausführlichkeit und Akribie – und nicht ohne Erfolg - Widersprüche u. a. bei der Klima-Debatte bzw. „Klima-Hysterie“ auf¹⁷.

Dabei werden nicht nur Journalisten-Kollegen und Politiker oder der „Moral-Multi“ Greenpeace attackiert. Auch und vor allem wird gegen Wissenschaftler und ihre Institutionen, wie das IPCC oder das „zum Deutschen Klima-Rechenzentrum hochgerüstete MPI für Meteorologie in Hamburg“¹⁸ polemisiert. Als das „beste Umweltbuch der neunziger Jahre“ wird in einer abschließenden Bücher-Liste die mehr als 700 Seiten umfassende, ähnlich abwegige Darstellung eines US-amerikanischen „Öko-Optimisten“ von 1995 [22] empfohlen.

¹⁷ Als ein besonders krasses Beispiel für einen vorschnellen Fehlschuss wird die computer-gestützte und öffentlichkeitswirksam verbreitete Vorhersage einer weiträumigen, heftigen Kältewelle im Gefolge des 1. Golfkrieges (1991) kritisiert. Für den - sehr bald tatsächlich eingetretenen - Fall, dass SADDAM HUSSEIN die Ölquellen anzünden würde, käme es durch den schwarzen Rauch zu einem künstlichen Winter mit verheerenden Folgen. Tatsächlich blieb es dann bei einer leichten lokalen Abkühlung. Dies illustriert die Unzulänglichkeit damaliger Rechnermodelle, die durch naive Nutzer ignoriert wurde. - Umgekehrt enthält z. B. eine Sonderausgabe des neoliberal orientierten Lexikons von 2002 [21] die Fehlprognose, dass der Energiepreis „mit der Liberalisierung des Strommarktes in den kommenden Jahren voraussichtlich kräftig sinken“ werde.

¹⁸ Dieses Max-Planck-Institut ist lediglich einer von mehreren Nutzern des Deutschen Klima-Rechenzentrums. Träger dieser Service-Einrichtung mit ihrer zur internationalen Spitze gehörenden Rechner-Leistungsfähigkeit sind neben der MPG drei weitere Gesellschafter. Siehe auch <http://www.dkrz.de>. - In einer Stellungnahme des Hamburger Instituts vom März 1991 wurde den in Fußn. 17 erwähnten Vorhersagen einer Kältewelle aufgrund eigener Simulationen widersprochen.

Solche - nur zu gern gelesenen - Darstellungen trugen zum „*business as usual*“ bei, wodurch bisher 1 ½ Jahrzehnte für durchgreifende Maßnahmen gegen den Klimawandel praktisch verloren gingen¹⁹.

Eine aktuelle, im besten Sinne des Wortes populärwissenschaftliche Darstellung zum Klimawandel stammt von HARTMUT GRASSL [25], der von 1994 bis 1999 das UN-Klimaforschungsprogramm leitete²⁰. Hinzuweisen ist auch auf die „*10 besonders verbreiteten Irrtümer über die Klimaerwärmung*“ am Ende des Buches von AL GORE [1]. Dazu hat der Verlag der deutschen Ausgabe jeweils Internet-Hinweise auf individuelle Konsequenzen und Reaktionsmöglichkeiten speziell für Deutschland eingefügt. Auch in den nichtelektronischen Medien sind genügend Beispiele für vorbildliches Handeln zu finden; so etwa in einem *Klima-Special* der Zeitschrift GEO [26].

Da die Medien sich neuerdings wieder auf apokalyptische Klima-Szenarien orientieren, was die Gefahr der Resignation mit sich bringt, sind solche Optionen von besonderer Bedeutung. Zwar stammen nur 3-4% der globalen Treibhausgasemissionen aus Deutschland; aber, so sagt eine Klima-Broschüre der Deutschen Physikalischen Gesellschaft [24] in diesem Zusammenhang: Es geht darum,

"Beiträge zu leisten, welche die anderen Akteure überzeugen, gemeinsam die richtigen Schritte zu unternehmen".

¹⁹Der 1992er Bericht der zuständigen Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages [23] schlug bis 2005 Reduktionen der CO₂-Emissionen um 20% im Durchschnitt der Industrieländer vor (statt 5% in 5 Jahren bis 2012 laut Kyoto-Protokoll), nachdem sich die BRD zu 25% (gegenüber 21% in Kyoto; s. a. [24]) verpflichtet hatte.

²⁰Danach war er (bis 2005) in Hamburg Professor an der Universität und Direktor am MPI für Meteorologie.

3 ROBERT DÖPEL, sein Klimamodell und die Aktualisierung

3.1 Wichtige Lebensstationen und Arbeiten DÖPELS

ROBERT DÖPEL (geb. 1895) schrieb mit 78 Jahren, getragen von hohem Verantwortungsgefühl, in Ilmenau seine erste und einzige Arbeit zum Klima [3] als ein „Quereinsteiger“ von der Energieseite her. Größte Bedeutung hat sein experimenteller Nachweis der Neutronenvermehrung in einem System aus Uranmetall und Schwerem Wasser im April 1942 erlangt. Er hat ihn zusammen mit seiner Frau und mit WERNER HEISENBERG als Theoretiker [3a] in Leipzig erbracht, was eine Voraussetzung für die in Deutschland angestrebte Nutzung der Kernspaltung zur Energiegewinnung darstellte.

Ende Juli desselben Jahres gelang auch der Gruppe um ENRICO FERMI in Chicago die Neutronenvermehrung mit einer Uranoxid-Graphit-Anordnung. Während FERMI eine im 20. Jahrhundert „*einmalige Doppelbegabung für theoretische und experimentelle Arbeiten*“ besaß [28], führte in Leipzig die Zusammenarbeit zwischen dem Theoretischen und dem Experimental-Physiker, als der DÖPEL 1938 seine erste Professur angetreten hatte, zum Erfolg. In einem Brief [4-F] erinnerte er sich noch 1982, wenige Monate vor seinem Tode:

„Das war die angenehmste Arbeitszeit, die ich in Leipzig überhaupt erlebt habe. ... Da saß man nun mit dem größten theoretischen²¹ Physiker jener Zeit im Labor oder sonst irgendwo zusammen, und alle Gespräche waren so erfreulich unbeschwert, daß alles so ideal war, wie man es nur wünschen konnte. ...

²¹ Statt „*physikalischen Physiker*“ im Original. Der Brief war an den Heisenberg-Experten HELMUT RECHENBERG gerichtet. Ihm dankt DÖPEL darin als dem Mitautor der Arbeit [28], die für die richtige Wahrnehmung der historischen Abläufe grundlegend ist.

Aber HEISENBERG über- oder unterschätzte gelegentlich die experimentellen Möglichkeiten.”

DÖPELS Frau KLARA übernahm „die Umrechnung der Messergebnisse für die Beantwortung der theoretischen Fragen”²². Sie hatte ihren Beruf als Juristin 1933 aus politischen Gründen aufgegeben und sich nach der Heirat in Würzburg, wo ihr Mann bis 1938 Privatdozent war, physikalischen Studien gewidmet. Bei den Leipziger Kernspaltungsexperimenten arbeitete sie unentgeltlich mit, und sie war der erste Mensch, der „bei der Auswertung der experimentellen Ergebnisse erkannte, daß eine Uranmaschine möglich war”²³.

„Heute weiß wohl hier in der DDR niemand mehr davon, dass damals solche Ergebnisse erzielt wurden”,

schrrieb DÖPEL am 28.12.1966 an HEISENBERG. Die inzwischen eindeutig geklärten Prioritäten werden manchmal auch jetzt noch verkürzt und falsch dargestellt. Zur Klärung trug vor allem eine Aussage im Epilog eines Buches von 1967 [29c] bei²⁴:

„Die Deutschen waren im ersten Halbjahr 1942 mit ihrem Leipziger Meiler L-IV die ersten Physiker in der Welt, die eine positive Neutronenproduktion zustande brachten.”

²²Brief DÖPELS vom 7.3.1976 an Frau ELISABETH HEISENBERG.

²³Nach einer Äußerung DÖPELS aus einer dem Wirken in Leipzig gewidmeten Arbeit [29]. Zusammen mit seiner Frau hat er dort auch mit einer Arbeit [29b], die bereits in Würzburg begonnene Untersuchungen fortsetzte und auf die er im Rückblick ebenfalls besonderen Wert legte, einen frühen Beitrag zur Neutronenaktivierungsanalyse geleistet.

²⁴Demgegenüber sind in manchen Details und auch in den aufeinander folgenden Titel-Formulierungen dieses Buches [29c] Dichtung und Wahrheit vermischt. Der weniger verkaufsfördernde erste Titel „*The Virus House*” bezog sich auf ein Berliner Laborgebäude, dessen Name abscheulich ansteckend klingen sollte. (Bestrebungen der Naziführung zum Bau der Atombombe wurden bekanntlich schon bald nach Kriegsbeginn als illusionär zurückgestellt, während die Fortführung des Energiegewinnungsprojektes am 4. Juni 1942 mit dem Reichsminister SPEER beschlossen wurde [28].) Das Buchexemplar DÖPELS enthält zahlreiche und zu Stellen, die ihn selbst betreffen, besonders bemerkenswerte Randnotizen. (Vgl. auch den oben zitierten Brief von 1982 [4-F].)

Am 24. Juni 1942 gingen in Leipzig die Arbeiten am Reaktor, der durch eine chemische Verpuffung zerstört wurde, zu Ende.

Schon vorher wurde eine Schwerpunktsverlagerung der Arbeiten HEISENBERGS an das Kaiser-Wilhelm-Institut (KWI) für Physik in Berlin beschlossen. Das Ehepaar DÖPEL vermochte seiner Bitte, ihn zu begleiten, in Voraussicht personalpolitischer Probleme nicht zu folgen²⁵ und schied damit aus dem Uranprojekt aus. In Berliner Institut und seinen wegen der Bombenangriffe eingerichteten Außenstellen gelang es während der drei noch verbliebenen Kriegsjahre trotz erhöhter Aufwendungen nicht, einen Reaktor kritisch werden zu lassen, d. h. die für den Dauerbetrieb erforderliche Neutronenvermehrung zu erreichen. Dagegen realisierte die Gruppe FERMIs bereits im Dezember 1942 eine solche Vermehrung, womit der deutsche Vorsprung endgültig verloren war.

Im April 1945, wenige Tage vor dem vor dem Einmarsch der US-Truppen, kam in Leipzig DÖPELS Frau KLARA bei einem Luftangriff ums Leben, während er einen Kurzbesuch bei seinen Eltern in Thüringen machte. - Im August desselben Jahres ging er zusammen mit anderen Wissenschaftlern in die Sowjetunion²⁶, wo er sich in einem Forschungsinstitut nahe Moskau an

²⁵Im oben zitierten Brief von 1982 heißt es: „*Leider ging Herr Heisenberg auch bei unvermeidbaren persönlichen Entscheidungen von der Vornehmheit seiner eingesetzten Mittel selbst dann nicht ab, wenn deren Erfolglosigkeit eigentlich schon von vornherein einzusehen war.*“ Im Umzugsplan, der als Beilage des Briefes mit abgedruckt ist [4-F], hatte er einen der NSDAP angehörenden Assistenten nicht mit für das KWI vorgesehen, dem es dann jedoch „*leichtfiel, seinen Übergang nach Berlin von seinen Nazigenossen im Heereswaffenamt anordnen zu lassen.*“

Eine Aussage in der bisher umfangreichsten und weitest verbreiteten HEISENBERG-Biografie [29a] von DAVID C. CASSIDY über „...Döpel, der dem Zentrum der Macht näherstand als die Berliner Gruppe, ...“, muss in ihr Gegenteil verkehrt werden: Schon wegen der politischen Linksorientierung seiner Frau KLARA hatte DÖPEL allen Grund, dieses Zentrum zu meiden. In einem Bestseller zur Kernenergie von 1956 [29d] wurde er, der nach politischen Auseinandersetzungen durch die Gestapo vorgeladen und verwahrt wurde [4-E], dennoch explizit als *Nationalsozialist* bezeichnet. In späteren Auflagen durfte das nicht mehr geschehen, was aber wenig an der Weiterverbreitung dieser Injurie (besonders im angelsächsischen Raum) ändert.

²⁶In Voraussicht der Ost-West-Alternative für die Arbeit nach einem verlorenen Krieg hatte sich DÖPEL in Gesprächen mit seinem Kollegen HANLE [31] schon bald nach Kriegsbeginn für

der Gewinnung Schweren Wassers zu beteiligen hatte. Jedoch „*soll er, bedingt durch den Tod seiner Frau, seelisch so destabilisiert gewesen sein, daß er kaum zum Arbeiten kam*“ [4-E], und wahrscheinlich ist er schon 1948 aus dem sowjetischen Atomprogramm ausgeschieden. Über seine Mitarbeit durfte er sich natürlich nicht näher äußern; wohl aber darüber, dass er sich mit Blick auf das labile „Gleichgewicht des Schreckens“ der Machtblöcke seiner ganzen Natur nach auf der schwächeren - als der richtigen - Seite sah.

„*Döpel, der egoistisches Besitz- und Konsumentenken ablehnte, muss sich unter russischen Menschen wohlgeföhlt haben*“, heißt es weiter bei HÖTZEL [4-E]. WADEWITZ [4-B] berichtet zu einem Brief vom 28.4.1981 über ein Gespräch mit DÖPEL, nach dem „*sein Entschluss, 1945 in die Sowjetunion zu gehen, auch dadurch bestärkt wurde, dass russische Hilfskräfte ihn nach dem Angriff auf das Leipziger Institut unterstützt hätten, seine dabei umgekommene Frau auszugraben.*“ - WERNER HEISENBERG ließ ihm bei erster Gelegenheit einen teilnahmsvollen Brief nach Russland zukommen²⁷, in dem es nach Erinnerungen an die häuslichen Treffen der beiden Ehepaare heißt:

„*Ihr Entschluss, nach Russland zu gehen, erscheint mir nach allem, was wir früher besprochen haben, menschlich verständlich und konsequent, und sie werden wahrscheinlich genauso über die Tatsache denken, dass wir jetzt hier in Göttingen sitzen.*“ [Weiterer Text von der sowjetischen Zensur unleserlich gemacht.]

Von 1952 bis '57 war DÖPEL Professor für Experimentalphysik an der Universität in Woronesh, wo er seine zweite Frau Sinaida, Ukrainerin und Witwe

den Osten entschieden. Beide blieben sich dennoch lebenslang freundschaftlich verbunden. Vor diesem Hintergrund verlieh die TH Ilmenau 1990 an WILHELM HANLE, der besonders durch den nach ihm benannten Effekt bekannt ist, einen Ehrendoktor-Titel.

²⁷Geschrieben am 22.10.1946 und abgedruckt als Beilage zu dem in Fußn. 21 erwähnten Brief an H. RECHENBERG vom 2.8.1982 [4-F]. - Ein persönliches Treffen gab es erst wieder 1967, als HEISENBERG seinen berühmt gewordenen Goethe-Vortrag [30] im Weimarer Nationaltheater hielt und anschließend in das nahe Ilmenau kam.

eines im 2. Weltkrieg gefallenen Offiziers, heiratete. Möglicherweise, so sagte er später, wären sie dort geblieben, wenn sich der versprochene Bau kernphysikalischer Laboratorien nicht verzögert hätte. Solche Laboratorien wurden ihm dann von der Hochschule für Elektrotechnik in Ilmenau zugesagt, wo er 1957 einen Lehrstuhl bekam und ab 1958 das neue Institut für Angewandte Physik leitete. Obwohl die Zusage der Einrichtung einer kerntechnischen Ausbildung und Forschung nicht eingehalten wurde, lehnte er 1959 einen erneuten Ruf nach Woronesh unter Hinweis auf sein Lebensalter ab.

Diese Zusage wird - unter Berufung auf Ilmenauer Quellen - meist als leichtfertig und DÖPEL als leichtgläubig bezeichnet, weil er sich zu fest darauf verließ [4-E]. Nach Aktenlage [31] gab es jedoch noch im Oktober 1957 die Unterschrift eines Ministers unter den Antrag zu seiner Ernennung für das Fach „Experimentelle Kernphysik“. Erst im Dezember, als er seine Tätigkeit bereits aufgenommen hatte, kam vom Staatssekretariat für Hochschulwesen das „Aus“ für das umfangreiche, bereits vor den Kontakten mit DÖPEL ausgearbeitete Vorhaben zur Ilmenauer Kerntechnik-Ausbildung. Die Ursachen für die daraus resultierenden Missshelligkeiten lagen also in Ostberliner Regierungs-Problemen.

Aber auch ein Senatsbeschluss, DÖPELS Dienstzeit entsprechend der früheren Mindest-Zusage bis 1963 zu verlängern, wurde nicht eingehalten, was zu erneuten, heftigen Auseinandersetzungen führte²⁸. Schließlich bekam er

²⁸Beispielsweise legt der Brief DÖPELS an einen Dresdner Kollegen vom 26.9.1962 [4-F] davon Zeugnis ab. Vom Senat der damaligen *Hochschule für Elektrotechnik* wurde eine handverlesene Kommission (ohne Naturwissenschaftler und Mathematiker) zur Prüfung eingesetzt. Obwohl deren Bericht u. a. die „nicht richtige“ Behandlung der Emeritierung „trotz des Hinweises des Staatssekretariats“ konstatierte, erklärte der Senat am 11.9.1962 die Angelegenheit als abgeschlossen.

In diesem Zusammenhang ist einer Schuldzuweisung an DÖPEL für seine „eigene Isolation“, die in [4-E] (mit freundlichem Bedauern) abgedruckt wurde, zu widersprechen. Sie erfolgte aus Sicht derjenigen Partei, deren Sekretär seinen Ausschluss aus der Fakultät beantragt hatte und damit seinen Austritt (und den Rücktritt als Prodekan) verursachte. Die Anfrage im erwähnten Brief von 1962 [4-F], ob ein solcher Antrag rechtens sei, war unter den bestehenden Machtver-

weitere, wenn auch stark verminderte Arbeitsmöglichkeiten im Institut zugestanden, da die Betreuung seiner 5 Doktoranden anders nicht möglich war. Er selbst war noch bis 1975 experimentell tätig, obwohl sein Sehvermögen stark abgenommen hatte. Wegen der Bezahlung einer Laborantin aus eigener Tasche wurden ihm von der Hochschulleitung „*kapitalistische Allüren*“ vorgeworfen, was er dem Hochschulminister noch 1981 im Dankschreiben für die Gratulation zum 85. Geburtstag vorhielt [4-E].

Sein Ilmenauer Forschungsgebiet war wieder die Gasentladungsphysik, die schon früher ein „zweites Standbein“ für ihn darstellte und die jetzt eine Renaissance erlebte [4-D]. Von hier aus suchte er, so wie früher von der Kernphysik her, die Verbindung zur Astrophysik, in der er sich ebenfalls einen Namen machte [32, 4-D]. Faszinierend waren seine Schaffenskraft und die Liebe, die er zur wissenschaftlichen Arbeit bis ins hohe Alter empfand²⁹. Darüber hinaus hatte er weit gespannte geistig-kulturelle Interessen (an die im letzten Abschnitt 4.2 angeknüpft wird). - Er verstarb 1982 am Tag vor seinem 88. Geburtstag in Ilmenau [32].

3.2 Die DÖPELschen Modellrechnungen und ihre Aktualisierung

Zunächst sei das geophysikalische Bilanzmodell aus dem bereits erwähnten Handbuchartikel [6], auf den DÖPEL aufbaut, mit aktualisierten Parametern so dargestellt, wie es auch im nächsten Abschnitt benötigt wird.

hältnissen eher rhetorischer Natur, zumal auch DÖPELS Opposition gegen politisch motivierte Exmatrikulationen eine Rolle spielte. - Richtig ist, dass sein streitbares und zu jeder Zeit unangepasstes Naturell nicht selten zur Konfrontation mit den jeweils Mächtigen und deren Handlangern geführt hat. Das bezeichnet er am Ende des Briefes als „*zur Belebung einer aktiven Gegenwehr notwendig*“.

²⁹Im erwähnten Brief (Fußn. 28) heißt es beispielsweise zur Spektralanalyse: „*Ein Spektrum ist für mich nicht nur ein physikalisches Dokument, sondern darüber hinaus beinahe so etwas wie eine Art Musik.*“

Im zeitlich und global gemittelten Strahlungsgleichgewicht Erde/Kosmos ist die auftreffende Solarstrahlung energetisch gleich der von der Erde mit ihrer Atmosphäre reflektierten und gestreuten plus der (vorzugsweise von höheren Atmosphärenschichten) ins Weltall emittierten, längerwelligen Temperaturstrahlung [9]. Diese kann mit der Näherungsannahme eines schwarzen Körpers bzw. einer Schicht der effektiven Strahlungstemperatur T_e nach dem STEFAN-BOLTZMANN-Gesetz berechnet werden. Damit ergibt sich die linke Seite der Energiebilanzgleichung:

$$\sigma T_e^4 = (1 - A) I_o / 4 \quad (1)$$

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$: STEFAN-BOLTZMANN-Konstante.

$T_e = 255 \text{ K}$: Effektive Gleichgewichts-Temperatur einer fiktiven, als schwarzer Strahler wirkenden Atmosphärenschicht.

$A = 0.30$: Planetarer Reflexionskoeffizient, entsprechend einer planetaren Albedo von 30%.

$I_o = 1367 \text{ W m}^{-2}$: Solar-”Konstante”. Auf diesen Referenzwert, der mit neueren Messungen der früher für konstant gehaltenen Strahlungsflussdichte am Oberrand der Atmosphäre gut übereinstimmt [9], hat man sich in der WMO (*World Meteorological Organization*) 1982 geeinigt.

Die 4 im Nenner der rechten Gleichungsseite ergibt sich aus der Umrechnung des Erdquerschnitts, auf den sich die Solarkonstante als Strahlungsintensität der Sonne im mittleren Erdbestand bezieht, in die für das Strahlungsgleichgewicht maßgebende Oberfläche der Erdkugel. Der additive Beitrag der anthropogenen Abwärme kann vernachlässigt werden.

Für die effektive Strahlungsgleichgewichts-Temperatur T_e resultieren mit diesem Bilanzmodell 255 K, entsprechend -18°C . Von DÖPEL wurden 250 K

aus dem Handbuch der Physik [6] verwendet, die sich mit der höheren Albedo $A = 0.35$ ergaben. Diese Temperatur wurde empirisch einer Höhe von etwa 6 km zugeordnet, die man „*etwa als mittlere Obergrenze der Wolken annehmen kann.*“

Eine solche Zuordnung ist jedoch schon wegen der hauptsächlich in den Wolkenlücken wirksamen Treibhausgase problematisch, und sie ist auch nicht erforderlich. Stattdessen wird für neuere Darstellungen die Obergrenze der Troposphäre, die im Mittel bei 11 km liegt [9], im Zusammenhang mit dem Forcing-Konzept (Abschnitt 3.3) wesentlich. Bis zu dieser Grenze, der Tropopause, nimmt die Temperatur ab auf mittlere 218 K, um dann innerhalb der Stratosphäre für einige km konstant zu bleiben und darüber wieder zuzunehmen. Mit dieser Inversion ist eine weitgehende Begrenzung für das Wettergeschehen verbunden, von dessen komplizierten Details in der Strahlungsbilanz völlig abgesehen wird.

Zwischen der Luft an der Erdoberfläche mit der mittleren Temperatur von 15°C (s. Fußn. 9) und der fiktiven, als schwarzer Strahler fungierenden Schicht ergibt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von $[15 + 18] \text{ K} = 33 \text{ K}$ (gegenüber $[15 + 23] \text{ K} = 38 \text{ K}$ bei DÖPEL), die auf den Treibhauseffekt zurückzuführen ist.

Ebenso einfach wie das Strahlungsbilanzmodell ist nun der Ansatz, den DÖPEL zur Abschätzung des Einflusses der anthropogenen Abwärme F_w auf die effektive Temperatur T_e verwendet hat. Danach wächst F_w exponentiell mit einem Steigungskoeffizienten q (entsprechend $100[q - 1]\%$) pro Jahr.

Mit dem Startwert $F_{w,o}$ gilt nach $\Delta t = t - t_0$ Jahren:

$$F_w = F_{w,o} \exp([q - 1] \cdot \Delta t / a) = F_{w,o} \cdot q^{\Delta t / a} \quad (2)$$

Für die zweite Teilgleichung wurde die Näherung $\ln q = q - 1$ verwendet. Mit der Strahlungsgleichung (1), deren rechte Seite die von der Erde aus der Sonnenstrahlung aufgenommene, mittlere Strahlungsflussdichte

$$l_s = 239 \text{ W m}^{-2} \quad (3)$$

darstellt, ergibt sich nach der Zeit Δt die effektive Temperatur

$$T_{e,t} = T_e \left(\frac{l_s + F_{w,o} \cdot q^{\Delta t/a}}{l_s} \right)^{1/4}. \quad (4)$$

DÖPEL verwendet für sein Startjahr 1970 $F_{w,o} = 0.016 \text{ W m}^{-2}$, was im Nenner gegenüber l_s vernachlässigt wurde. Hier sei außerdem die binomische Näherung verwendet:

$$\Delta T_e = T_{e,t} - T_e = T_e \frac{F_{w,o}}{4l_s} q^{\Delta t/a} \quad (5)$$

oder

$$\Delta T_e = \frac{T_e}{4l_s} F_w = 0.27 F_w \frac{K m^2}{W}. \quad (6)$$

Damit ist direkte Proportionalität zwischen der Temperatur-Zunahme und dem aktuellen F_w mit dem Faktor

$$\lambda_e = 0.27 \frac{K m^2}{W}$$

gegeben. Die gleiche Näherung ergibt sich auch direkt aus der Bilanzgleichung (1) mit der Strahlungs-Flussdichte l_s aus Gl. (3), wenn man diese nach T_e differenziert und den Differentialquotienten dem Differenzenquotienten mit $\Delta l_s = F_w$ gleichsetzt. Allgemein (mit F statt F_w sowie mit *Klimasensitivi-*

tätsparametern λ) dient diese Näherung auch als Ausgangspunkt für die Diskussion des Einflusses von Variationen der Solarstrahlung (im Abschnitt 3.3) und für die Definition einer Klimasensitivität beim CO_2 -Einfluss (in 3.4).

Diese Gemeinsamkeit im grundlegenden Ansatz wird für den klimatologischen Laien infolge der anschließenden Behandlung der unterschiedlichen Rückkopplungen, bei der das jeweilige Expertenwissen zum Tragen kommt, meist nicht ersichtlich.

Von DÖPEL werden Rückkopplungen nicht explizit berücksichtigt; lediglich die zunehmende Verdampfung des ozeanischen Wassers³⁰ wird erwähnt, die mit negativer Rückkopplung durch die erhöhte Albedo einer dann dichteren Wolkendecke verbunden ist.

In Abbildung 2, die auch für die nachfolgenden Abschnitte grundlegend ist, sind die Abwärme-Einflüsse des Teils (c) unterhalb der aktuellen Modellbetrachtungen zum CO_2 mit den Teilen (a) und (b) wiedergegeben, die erst im Abschnitt 3.4 besprochen werden. In den ausgezogenen Verläufen der Abb. 2c ist die Zunahme der effektiven Temperatur ΔT_e nach Gl. (4) oder (6) dargestellt, wobei die Näherungen praktisch ohne Einfluss auf das Bild sind. Für das Startjahr 2000 wurde mit

$$F_{w,o} = 0.023 \text{ W m}^{-2} \quad (7)$$

gerechnet. Dieser Wert ergibt sich aus einer detaillierten tabellarischen Darstellung des Wissenschaftlichen Beirats „Globale Umweltveränderungen“ der BRD³¹. Dabei wurden hier von der gesamten Abwärme 13 % für die

³⁰Zur Ausnutzung der Wärmekapazität der Ozeane durch eine fiktive Verlagerung der Industrieproduktion tief unter deren Oberfläche erfolgt in [3] eine Abschätzung, die vernachlässigbar geringe Verzögerungen der globalen Erwärmung ausweist. - In diesen Zusammenhang gehören auch heutige Vorschläge aus der „Cleantech-Branche“, Kraftwerks- CO_2 durch Einleiten in das ozeanische Tiefenwasser zu entsorgen [25].

³¹Tab. 4.4-1 im WBGU-Hauptgutachten 2003 „Welt im Wandel - Energiewende zur Nachhaltigkeit“. Kostenlose Broschüre auch unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html.

regenerativen Energien abgezogen, die der Sonneneinstrahlung entstammen.

Für die Zunahme der Temperatur an der Erdoberfläche T_s stellt ΔT_e eine Untergrenze dar, auch wenn man - wie DÖPEL - von der Verstärkung des Treibhauseffektes absieht.

Die Differenz zwischen der Temperatur T_e der fiktiven Atmosphärenschicht, die gewissermaßen als Treibhausdach wirkt, und der Bodentemperatur T_s wirkt nämlich als Triebkraft für den Transport der vorzugsweise am Boden absorbierten Sonnenstrahlenenergie zur fiktiven Schicht nach oben. Diese Temperaturdifferenz, die in späteren Modellen mit Rückkopplungsfaktoren erfasst wird, kann keinesfalls größer werden, wenn die anthropogene Abwärme zusätzlich in Bodennähe eingespeist wird.

Den aktuellen Einfluss dieser Abwärme (0.03 W m^{-2} als F_w für 2007) auf T_s hat GRASSL [25] abgeschätzt, wobei er berücksichtigt, dass am Boden nur 50 % der in die Atmosphäre eintretenden Strahlungsflussdichte $l_o/4$ der Sonne absorbiert werden³². Gegenüber $l_s = 239 \text{ W m}^{-2}$ aus Gl. (3) wird damit der Bezugswert für die Abwärme um den Faktor $l_{ob}/l_s = 2/3$ auf

$$l_{ob} = 170 \text{ W m}^{-2} \quad (8)$$

vermindert. Dies ändert nichts an der Vernachlässigbarkeit der aktuellen anthropogenen Abwärme für das Klima, die mit der Abschätzung illustriert werden sollte.

Als langwellige Abstrahlung der Erdoberfläche tritt der höhere Wert $\varepsilon \sigma T_s^4$ an die Stelle der linken Seite der Strahlungsgleichung (1). Mit dem langwelligen Emissionsgrad $\varepsilon \approx 0.9$ [9] wird berücksichtigt, dass die „irdische“ Oberfläche (Pedo-, Hydro- und Kryosphäre) kein schwarzer Strahler mit der Temperatur

³²Im Detail ergibt sich dies beispielsweise aus Abb. 3.5 und Tab. 3.7 in [9].

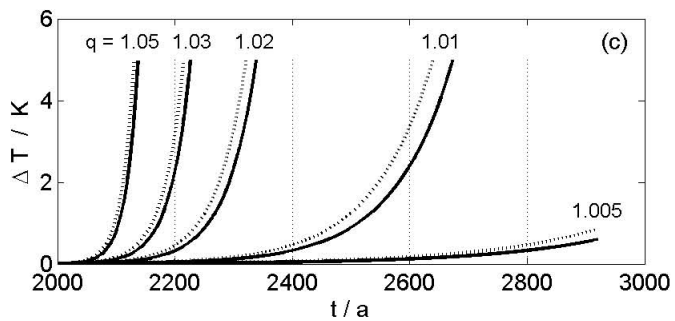
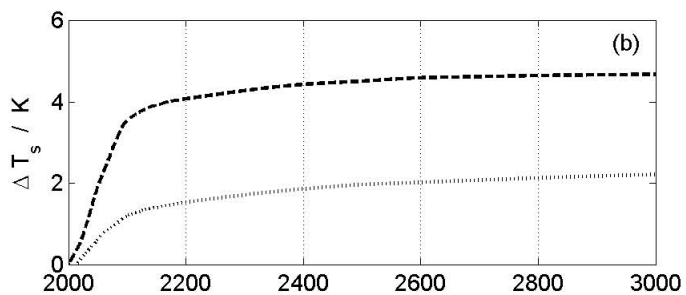
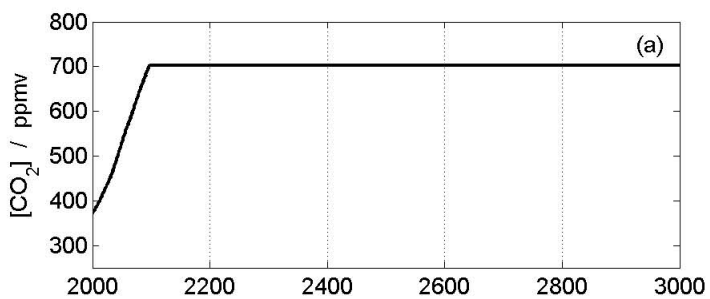


Abbildung 2: **(a)** Atmosphärischer CO_2 - Konzentrationsverlauf (nach Daten aus Fig. 10.34a in [2]) entsprechend einem Emissions-Szenarium des Typs A1B (s. Fußn. 36) bis zum Jahr 2100 mit der Konzentration 700 ppmv. Diese wird danach als Fiktion beibehalten.

(b) Zu (a) gehörige Verläufe der globalen Oberflächentemperatur-Zunahme ΔT_s der Erde aus zwei IPCC-Modellrechnungen von 2007 zum Treibhauseffekt:

Gestrichelt: Modell CLIMBER-3 α ; **Punktiert:** Modell LOVECLIM; nach [44] und [45] mit Daten aus [2], Fig. 10.34b. (Dort liegen zwischen diesen beiden 6 weitere Verläufe zum Emissions-Szenarium (a) aus den Modellrechnungen anderer Autoren. Die vollständige Fig. 10.34 wird in der englischen Kurzfassung wiedergegeben und weiter kommentiert, die in Fußn. 5 angekündigt ist.)

(c) Auswirkungen der anthropogenen Abwärme ohne Berücksichtigung des Treibhauseffektes und ohne Gegenmaßnahmen.

Ausgezogene Verläufe: Mit dem DÖPEL-Modell neu berechnete Verläufe der Änderung $\Delta T = \Delta T_e$ der effektiven Strahlungsgleichgewichtstemperatur T_e Erde/Kosmos mit dem jährlichen Steigerungskoeffizienten q der Erzeugung nicht-regenerativer Energie als Parameter, entsprechend $100(q - 1)\%$ Wachstum pro Jahr. ΔT_e aus Gl. (6) gilt bei DÖPEL als Mindestwert für die Zunahme der globalen Oberflächentemperatur T_s infolge der Abwärme.

Punktierte Verläufe: $\Delta T = \Delta T_{ob}$ als ein wahrscheinlicherer Mindestwert für die T_s -Zunahme durch Abwärme, abgeschätzt entsprechend einer „Oberflächen-Variante“ des DÖPEL-Modells.

T_s ist, während für die Atmosphäre mit der effektiven Temperatur T_e *per definitionem* $\varepsilon = 1$ gilt. Auf der rechten Seite der Oberflächen-Strahlungsbilanz wären außer l_{ob} die konvektiven Wärmeströme nach oben und die Rückstrahlung aus der Atmosphäre zu berücksichtigen [9], was hier ebenso wenig wie bei GRASSL geschieht.

Seine Verminderung des Bezugswertes für die Abwärme an der Oberfläche soll zunächst dazu dienen, eine Vorstellung vom Einfluss einer Vergrößerung des Proportionalitätsfaktors λ auf die Kurvenverläufe zu erhalten. Mit dem entsprechenden Faktor

$$\lambda_{ob}/\lambda_e = l_s/l_{ob} = 1.5$$

sei der zu Gl. (6) analoge Ansatz für die durch Abwärme bedingte Temperaturänderung

$$\Delta T_{ob} = 1.5 \cdot \Delta T_e = 0.4 F_w \frac{K m^2}{W} \quad (9)$$

verwendet. Er kann als eine „Oberflächen-Variante“ des DÖPEL-Modells bezeichnet werden³³, für die allerdings die gute Fundierung dieses Modells nicht mehr gegeben ist. Es soll damit vor allem gezeigt werden, dass sich Änderungen des Prä-Exponentialfaktors (allgemein: λ) relativ wenig auswirken, solange man für die Abwärme am exponentiellen Wachstum festhält. - Der angenommene Wert

$$\lambda_{ob} = 0.4 \frac{K m^2}{W}$$

³³Das Forcing bleibt bei dieser Variante unverändert. Sie hat nichts mit einem *surface forcing* zu tun, das manchmal - vorzugsweise für Aerosole - zusätzlich zu unserem radiativen Forcing (s. Fußn. 3) verwendet wird. Beide Größen können sich zeitlich gegenläufig ändern ([2], Fig. 2.23).

ist um einen Faktor 1.5 größer als λ_e . Dieser ist größenordnungsmäßig vergleichbar mit Rückkopplungsfaktoren, die bei Abschätzungen zum anthropogenen Treibhauseffekt bereits im vorigen Jahrhundert für die Zunahme des Wasserdampfdrucks und das Abschmelzen von Eis Verwendung fanden, wobei der Unterschied zwischen ΔT_e und der Oberflächentemperatur-Änderung ΔT_s implizit berücksichtigt wurde. Beispielsweise sind in [7] Faktoren mit einem „Unsicherheitsintervall“ von 1.2 bis 4 angegeben, während in [33] (mit Math. Anhang 4) ein Faktor 2 verwendet wird. Dem gegenüber resultieren Faktoren um den Wert 3 aus den aktuellen, aufwändigen Modellrechnungen zum stoffspezifischen anthropogenen Treibhauseffekt des CO_2 , wobei Werte unterhalb 1.5 als sehr unwahrscheinlich gelten (Abschnitt 3.4). Diese Faktoren stellen Endwerte für einen „Gleichgewichtszustand“ dar, der erst nach Jahrhunderten zu erwarten ist, wobei konkrete Zeitverläufe noch nicht berechnet wurden.

Schon deshalb sind aus diesen Betrachtungen, die weit weniger durchsichtig sind als diejenigen DÖPELS, keine quantitativen Aussagen zu einem verzögerungsfreien Rückkopplungseinfluss beim Abwärme-Effekt abzuleiten. Man darf jedoch folgern, dass die Zunahme der Oberflächentemperatur in Abb. 2c nicht nur oberhalb des ausgezogenen ΔT_e wie bei DÖPEL, sondern sehr wahrscheinlich auch oberhalb des punktierten ΔT_{ob} aus der Oberflächenvariante liegt, aber deutlich weniger als eine Größenordnung. Ein wesentlich früheres Eintreten der abwärme-bedingten Temperaturerhöhung als bei den ΔT_{ob} -Verläufen ist also nicht zu erwarten, was die wesentlichste Aussage dieser recht umständlichen Rückkopplungs-Betrachtungen darstellt.

Ähnlich gering wie die Unterschiede der ausgezogenen gegenüber den gestrichelten Verläufen sind auch die Differenzen gegenüber DÖPELS Bild 1 [3]³⁴. Zwischen 1970, dem Startjahr für die Rechnungen DÖPELS, und 2005 wird

³⁴Dessen beide Kurven zu jedem q-Wert für die Temperaturen (in $^{\circ}C$) fallen in unserer Darstellung von Temperaturdifferenzen zusammen.

z. B. in [35] ein mittleres Wirtschaftswachstum von 2 % pro Jahr angegeben. Daher ist der Unterschied des Verlaufs für $q = 1.02$ in seinem Bild 1 und der Fortsetzung ab dem Jahr 2000 in unserer Abbildung 2c besonders gering³⁵. Für die übrigen q -Werte führt ihr Unterschied gegenüber dem aktualisierten 1.02 zwischen 1970 und 2000 zu etwas größeren Abweichungen. Diese bleiben aber immer noch deutlich unter dem Einfluss des Steigerungskoeffizienten q , selbst bei dessen höchsten Werten. Auf letztere konzentriert DÖPEL die Diskussion - dem damals in den Industrieländern gängigen Wirtschaftswachstum entsprechend. Lediglich das hier weggelassene $q = 1.07$ galt ihm als „vielleicht zu hoch gegriffen“. Am unteren Ende der Skala wurde $q = 1.005$ hinzugefügt, wobei der besonders weit reichende, annähernd lineare Anfangsverlauf zeigt, dass auch bei geringerem als exponentiellen Wachstum dessen Grenzen absehbar sind.

Die heutigen Wachstums-Prognosen für die Abwärme (mit unterschiedlichen Anteilen aus nicht-regenerativen Energien) bis zur Mitte unseres Jahrhunderts gruppieren sich um die 2 % pro Jahr³⁶. Damit ergibt sich nach der Näherungsgleichung für die Verdoppelungszeit bei exponentiellem Wachstum

$$t_{dop}/a = \frac{\ln 2}{q - 1} \approx \frac{70}{2} = 35 \quad (10)$$

³⁵Er hängt u. a. mit der bereits erwähnten Verwendung einer höheren Albedo ($A = 0.35$ statt 0.30) in Gl. (1) zusammen. Vor allem aber liegt der unter Gl. (4) angeführte Startwert $F_{w,o}$ von DÖPEL (mit der Genfer Atomenergie-Konferenz als Quelle) zu hoch gegenüber demjenigen, der mit einem 2 % - Wachstum auf den Wert in Gl. (7) für unsere Abb. 2c führen würde. Daran ändert auch der Abzug von Beiträgen der traditionellen Biomasse-Verbrennung und der Wasserkraft vom 1970er $F_{h,o}$ wenig, die sich zeitlich nicht stark ändern. Mit zusammen 7 % machen sie die reichliche Hälfte der regenerativen 13 % aus, die oben nach Fußn. 31 für das Jahr 2000 abgezogen wurden.

³⁶Dieser Wert kann für die Zeit bis 2050 den Tabellen TS-3 in [34] zu den Szenarios vom Typ A1B, für den Abb. 2a gilt, entnommen werden. Danach (bis 2100) werden dort etwas abnehmende Werte verwendet.

eine weitere Verdoppelung bis 2040. Im erwähnten WBGU-Hauptgutachten von 2003 (Fußn. 31) wird bis 2050 sogar eine Verdreifachung prognostiziert, entsprechend nahezu 3% /a. Demgegenüber wird im Kommentar zu einer Studie „*Energiepolitisches Gesamtkonzept 2030*“ von 2007 [36] eine Steigerung „bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um mehr als zwei Drittel über den heutigen Stand“ angenommen, was reichlich 1 % /a bedeutet. Die heute führenden Länder tragen zum globalen Wachstum immer weniger bei³⁷, da die Bevölkerungsentwicklung eine entscheidende Rolle übernimmt. Wachstums-Spekulationen über 2050 hinaus werden im Abschnitt 4.1 diskutiert.

„Intensivste technische Ausnutzung der eingestrahnten Sonnenenergie“

So hat DÖPEL seinen Abschnitt 5.3 überschrieben, wobei er jedoch ausschließlich die photovoltaische Erzeugungsmöglichkeit elektrischer Energie behandelt. Deren Effizienz setzt er mit maximal 20 % an, die in Zukunft etwas überschritten werden dürften. Den nutzbaren Anteil der reichlich 30 % Festlandsfläche des Globus schätzt er auf 10 %, was als recht hoch gegriffen erscheint. Damit ergeben sich verfügbare $5 \cdot 10^{14} \text{ W}$ (gegenüber 10^{14} W aus [2-2007], WG III Tab. 4.2). Der Ausnutzungskoeffizient für die insgesamt eingestrahlte Solarenergie ist

$$K = 0.2 \cdot 0.3 \cdot 0.1 = 6 \cdot 10^{-3}.$$

Durch Einsetzen in Gl. (2) resultiert zusammen mit (8) (an Stelle von (3) in [3]):

$$\frac{F_w}{l_{ob}} = \frac{F_{w,o}}{l_{ob}} q^{\Delta t_K/a} = 6 \cdot 10^{-3} \quad (11)$$

³⁷Nach DENNIS MEADOWS wird Deutschland hinsichtlich seiner Wachstumsgrenzen in den kommenden 25 Jahren „mehr Veränderungen erleben als im 20. Jahrhundert zusammen“, wie er 2008 in einem Interview erklärte [12a]. Nachdem der heute 65-jährige mit vielen früheren Vorseheren Recht behalten hat, ist dies zumindest eine bedenkenswerte Warnung vor vereinfachten Extrapolationen.

mit dem globalen Energiebedarf F_w und einem Startwert $F_{w,o}$. Bei ausschließlicher Verwendung von Photovoltaik-Strom bliebe die globale Temperatur bis zum Erreichen dieses Wertes konstant. Aber danach müsste ein weiteres exponentielles Wachstum des Energiebedarfs aus anderen Quellen abgedeckt werden. Wären diese Zusatz-Beiträge $F_{w,z}$ nicht-regenerativ, so würden die Temperaturen nach Ablauf der Zeit Δt_K gemäß Gl. (9) , jedoch mit $F_{w,z}$ an Stelle von F_w , wieder ansteigen.

Es ergeben sich mit den Steigerungskoeffizienten

$q = 1.05, 1.02$ bzw. 1.01 für die Zeiten konstanter Temperatur:

$$\frac{\Delta t_K}{a} = 78, 192 \text{ bzw. } 381 \text{ Jahren ab dem Jahr } 2000^{38},$$

das auch für Abb. 2c als Start gewählt wurde. Würde in diesen Zeiträumen nicht-regenerative statt der solaren Energie verwendet, so wäre der Anstieg ΔT_{ob} kleiner als 0.5 K .

Entsprechendes konstatierte DÖPEL für ΔT_e , und mit seinem Startwert $F_{w,o} = 0.016 \text{ W m}^{-2}$ von 1970 resultieren ähnliche Zeiten Δt_K wie oben (sowie für das damalige $q = 1.07$ nur 65a, entsprechend dem Jahr 2035). Er schließt die Betrachtung damit, dass auch die intensivste Nutzung der Sonnenenergie nichts an der prekären Sachlage ändere. Seine Schlussfolgerung³⁹ in der Zusammenfassung lautet:

„Die einzige Möglichkeit, jenen bedrohlichen Temperaturanstieg zu verhindern, liegt in einem globalen, allmählichen Übergang zur völligen Konstanz der gesamten Energieerzeugung.“

³⁸Bei jeder weiteren Halbierung des jährlichen prozentualen Wachstums steigt Δt_K etwa auf das Doppelte (entsprechend der Näherung $\ln q \approx q - 1$).

³⁹Zuvor werden von ihm technische Gegenmaßnahmen diskutiert und als kaum wirksam erkannt. (Vgl. Fußn. 30.) Nicht betrachtet wird der Übergangsbereich vom exponentiellen Wachstum zur Sättigung, in dem man sich mittelfristig bewegen wird. Formal wäre dafür am einfachsten eine logistische Funktion anzusetzen, wie sie für populationsdynamische Modelle üblich ist. (Siehe z. B. [14], Abschnitt 3.3-3.5, auch zu den wahrscheinlicheren Grenzüberschreitungen oder -überschreitungen aus [12a].)

Unter der auf das gesamte Wirtschaftswachstum erweiterten Bezeichnung *Nullwachstum*, mit Bezug auf die Berichte an den *Club of Rome* [11, 12], fand diese ebenso kühne⁴⁰ wie zwingende Schlussfolgerung in den 1980er Jahren in Westeuropa vorübergehend Eingang in manche der grünen Parteiprogramme. Eine politisch korrekte Bezeichnung aus der Volkswirtschaftslehre für das Fehlen von Wachstum ist *Stagnation*, die man wohl nicht fordern wird, sondern nur erdulden kann, ebenso wie ein Schrumpfen. Im übrigen unterschieden schon die Autoren des *Club of Rome* zwischen unterschiedlichen Arten des Wachstums, und sie wussten sich gegen den Vorwurf der „Weltuntergangsprophetie“ zu wehren [12, 12a].

Durch die seither eingetretenen wirtschaftlichen Entwicklungen, die mit der Durchsetzung der parlamentarischen Demokratie in Teilen Osteuropas einhergingen, haben sich zudem neue Möglichkeiten ergeben. So entsteht beispielsweise in einer ostdeutschen Region, die vormals höchste Umweltlasten verursachte, mit dem „*Solar Valley*“ das führende Gebiet Europas für Photo-

⁴⁰Unter dem nach ungebretem Wachstum strebenden DDR-Regime, das dabei den Westen überholen wollte, waren solche Folgerungen äußerst missliebig. Das *Nullwachstum* wurde z. B. in [37] als „*utopisch-reaktionäre politische Schlussfolgerung*“ bezeichnet, und DÖPELS Publikation [3] galt bei der Leitung der TH Ilmenau als unverantwortlich. Schon deshalb konnte sein Schlusssatz mit „*einer weltweiten sozialistischen Orientierung*“ für eine „*dauerhafte harmonische Lösung*“ nicht auf den *real existierenden Sozialismus* bezogen werden. (Beispielsweise geht dies aus einem ausführlichen Brief DÖPELS zu politischen Fragen vom 11.2.1976 [4-B] hervor.) Vielmehr wurde DÖPEL nach dem *Prager Frühling* von 1968 - zu Recht - des Eintretens für einen *Sozialismus mit menschlichem Antlitz* verdächtigt.

Der sehr ausführliche und professionelle, wenngleich ohne persönliche Bekanntschaft entstandene DÖPEL-Artikel von HÖTZEL [4-E] aus dem *Historischen Seminar der Universität Leipzig* (s. a. Fußn. 28) enthält einen besonderen Abschnitt „*Döpel und der Sozialismus*“. Er konstatiert zwischen DDR- und anderen Darstellungen eine „*objektive Widersprüchlichkeit*“, deren Lösung möglicherweise „*im bisher noch unerschlossenen privaten Briefwechsel verborgen*“ sei. Jedoch endet der oben erwähnte, ausgesprochen private Brief DÖPELS an den Vertrauten H. WADEWITZ [4-B] so: „*Aber für die Erörterung solcher Fragen sind Gespräche ergiebiger als Briefe...*“. Aus Gesprächen im kleinen Kreis müssen die von HÖTZEL vermuteten „*Differenzen zu Form und Praktiken des Sozialismus in der DDR*“ bei ROBERT DÖPEL bekräftigt werden. Das Zerwürfnis mit Funktionären der Ilmenauer Hochschule hat - entgegen manchmal noch heute gehörten, anderen Behauptungen - hier seine Gründe.

voltaik⁴¹. Auch neue technische Aspekte haben sich aufgetan, die gegenwärtig in aller Munde sind. Hier soll lediglich, wieder unter dem Motto „*Ausnutzung der Sonnenenergie*“, die technisch längst mögliche, aber viel zu wenig praktizierte Stromerzeugung durch solarthermische Kraftwerke hervorgehoben werden. In sonnenreichen Regionen sind dabei ähnliche Wirkungsgrade wie mit der Photovoltaik erreichbar, mit der sie auch kombiniert werden kann. Die bereits am Ende des Abschnitts 2 zitierte DPG-Studie von 2005 [24] enthält ein wohlbegründetes „*Plädoyer für solarthermische Kraftwerke im Sonnengürtel*“⁴², für die EU besonders um das Mittelmeer. Zusätzlich zu ihren südlichen Mitgliedsändern mit ersten Versuchskraftwerken hat sie in der neuen Mittelmeerunion große, bisher unerschlossene Möglichkeiten.

Solche Bemühungen zielen natürlich auf die Abschwächung der bereits spürbaren Verstärkung des Treibhauseffekts hin. Zur Abwärme wurden dagegen keine weiteren Überlegungen gefunden. Die Abschätzung von GRASSL [25], die bereits für Abb. 2c (Abschnitt 3.2) genutzt wurde, sollte lediglich dem Beweis dienen, dass gegenwärtig praktisch keine Temperaturzunahme durch anthropogene Abwärme eintritt.

Man muss wohl davon ausgehen, dass die zwar in einer kleinen wissenschaftlichen Hauszeitschrift publizierte, aber von einem namhaften Physiker stammende Arbeit [3] - ebenso wie einschlägige Prognosen in weiter verbreiteten Schriften aus den 1970er Jahren (Abschnitt 2) - weitgehend vergessen ist und

⁴¹Es umfasst ehemals hochindustrialisierte Teile von Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt (<http://www.solarvalley.org>), denen zwar kein Tal gemeinsam ist, wohl aber die Hoffnung auf *blühende Landschaften*. Sie wird durch umfangreiche, staatliche Investitionen des Emirates *Abu Dhabi* (<http://www.masdar.ae>) gestützt.

⁴²Bereits 1992 wurde von der zuständigen Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages [23] auf das „*in fast 20 Jahren Forschung, Entwicklung und Demonstration Erreichte*“ verwiesen und dringend ein solarthermisches Musterkraftwerk in einem südlichen Partnerland empfohlen. Mit zusätzlicher Verspätung sind neuerdings solche Kraftwerke entstanden, und man hofft in ein bis zwei Jahrzehnten auf wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit. Deutschland trägt maßgeblich zu dieser Technologie bei und kann mit Hochspannungs-Gleichstromleitungen wesentliche Beiträge zu seiner Versorgung erhalten.

dass ein künftiger Einfluss der Abwärme derzeit ignoriert wird⁴³. In Deutschland und anderen Industrieländern, wo mit der Forderung nach Sicherheit bis zum Jahre 10⁶ die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Frage gestellt wird⁴⁴, ist dies am wenigsten zu verstehen, zumal der Zeithorizont bei den meisten anderen klimarelevanten Betrachtungen kaum über das Jahr 2100 hinausreicht. - Weitere Überlegungen zur Kernenergie folgen im Abschnitt 4.1.

3.3 Das Forcing-Konzept und die Sonne

Wird die durch Gl. (1) beschriebene Gleichheit zwischen der von der Erde aufgenommenen Solarstrahlung und der ausgesandten infraroten Temperaturstrahlung gestört, so wirkt die Differenz der Strahlungsstromdichten als (Anfangs-)Triebkraft oder Forcing für die Wiedereinstellung des Strahlungsgleichgewichts. Bei diesem Vorgang nimmt die Triebkraft auf Null ab, während für das Forcing stets der Anfangswert angegeben wird.

Nach einer „*standard definition*“ (in [2, 38]) ist das Forcing allgemein gegeben durch die Netto-Strahlungsstromdichte in die Troposphäre an ihrer Obergrenze, der Tropopause. Wie im Anschluss an Gleichung (1) beschrieben, liegt in diesem Grenzbereich für das Wettergeschehen ein Temperaturminimum mit aufliegendem „Inversionsdeckel“ vor. Dadurch ist eine recht gut definierte Situation gegeben. Zudem erfolgt die thermische Gleichgewichtseinstellung in der Stratosphäre⁴⁵ und darüber wesentlich rascher als in der Troposphäre, deren größere thermische Trägheit vor allem durch die Kopp-

⁴³Zur Nichtberücksichtigung durch das IPCC s. Abschnitt 3.4.

⁴⁴Noch gelten z. B. für die BRD 10⁴Jahre nach einer Regelung von 1983, die jedoch durch einen Entwurf des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit* auf 10⁶Jahre erhöht werden sollen.

⁴⁵Das dabei resultierende F wird auch als *stratosphärisch adjustiertes Forcing* (F_a in [38] Fig. 2; s. a. [2] Fig. 2.2) vom ursprünglichen und annähernd gleichen *instantanen Forcing* (F_i) unterschieden. - Weitere Definitionen können hier ebenso wenig behandelt werden wie die umfangreichen, dazu benutzten Details.

lung an die Ozeane bedingt ist. Ohne diese Kopplung würde sich für die troposphärische Gleichgewichtseinstellung weniger als ein Monat ergeben. Bei Einbeziehung des oberen Ozeans dauert sie Jahre bis Jahrzehnte und mit dem tiefen Ozean und dem Eisschild Jahrhunderte bis Jahrtausende (laut [2], Box TS.9).

Für F gilt innerhalb der Troposphäre die Fiktion eines unveränderten Temperaturverlaufs. Im Sinne eines Gedankenexperiments wird schließlich auch hier die thermische Gleichgewichtseinstellung für alle Prozesse zugelassen, deren Forcings sich additiv zu F zusammensetzen. Dabei steigt die Temperatur an der Erdoberfläche um

$$\Delta T_s = \lambda F \frac{\text{Km}^2}{\text{W}} \quad (12)$$

als *Response* in der *Forcing-Response-Beziehung*. Der (Klima-)Sensitivitäts-Parameter λ gibt die Änderung der globalen Jahresmitteltemperatur bei Änderung des Forcings um eine Einheit an. Er ist modellabhängig und erfasst Rückkopplungen, wobei die eindeutigste Situation bei Extrapolation der Zeit auf ∞ resultieren würde (im „Gleichgewicht“, s. Abschnitt 3.4).

Im anderen Extrem wird verzögerungsfreie Einstellung des Strahlungsgleichgewichtes mit dem aktuellen Forcing F angenommen, was am ehesten ohne Rückkopplungen gelten würde. Eine solche „Änderung bei währendem Gleichgewicht“ (eigentlich: Fließgleichgewicht bei Quasistationarität [14]) war Voraussetzung bei den Rechnungen des vorigen Abschnitts mit Gl. (9) für die „Oberflächen-Variante“ des DÖPEL-Modells. Für die natürliche Veränderung der solaren Strahlungsflussdichte I_s aus Gl. (3) um ein Forcing F_s kann dementsprechend der Ansatz

$$\Delta T_s = \Delta T_e = 0.27 F_s \quad (13)$$

mit dem Klima-Sensitivitätsparameter λ_e aus Gl. (6) versucht werden. Für die 11-Jahres-Zyklen der Sonnenflecken mit einem Unterschied von 0.08 % zwischen maximaler und minimaler Strahlungsflussdichte [2], entsprechend einem $F_{s,cycl} = 0.2 \text{ W/m}^{-2}$, resultiert

$$\Delta T_{s,cycl} = 0.05 \text{ K.} \quad (14)$$

Die gleiche Größenordnung (zwischen 0.02 und 0.08 K) ergibt sich bei diesem Versuch auch für den Beitrag zur Zunahme der globalen Temperatur seit 1750, der noch kaum verstanden wird [2]. Unsicherheit besteht zudem hinsichtlich sekundärer Einflüsse wie einer veränderten Keimzahl für die Wolkentröpfchenbildung durch das Variieren der kosmischen Strahlung infolge Modulation des Erdmagnetfeldes. Dabei gilt aber [25]:

„In der Zeit stärkster Erwärmung während der vergangenen 25 Jahre hat die Sonne nicht zu ihr beigetragen.“

Das Gegenteil wird beispielsweise in [39] von einem Meteorologen mit juristischer Attitüde verkündet, wobei das Kohlendioxid „*freigesprochen*“ wird. Im Gegensatz dazu schließt z. B. auch das MPI für Sonnensystem-Forschung (Kattlenburg-Lindau) in seiner Pressenotiz 8/2004 „*die Sonne als Verursacherin der gegenwärtigen globalen Erwärmung aus*“, wobei die früheren Einflüsse ein „*Gegenstand weiterer Forschung*“ sind [40].

Wegen der genannten Unsicherheiten wurde z. B. in [38] vom solaren Forcing (als einer in früheren Publikationen benutzten Bezugsgröße) zum besser verstandenen CO_2 mit dem größten anthropogenen Forcing übergegangen, das auch vom IPCC bevorzugt und im nächsten Abschnitt behandelt wird.

3.4 Einbeziehung des anthropogenen Treibhaus-Effekts

Angesichts der sehr umfangreichen Materialien zu den Ursachen und Folgen der aktuellen globalen Erwärmung⁴⁶ kann es in diesem Abschnitt lediglich um Hintergrundinformationen zu Abb. 2a und b (Abschnitt 3.2) sowie um allgemeine Gegenüberstellungen gehen, die angesichts einer gewissen Lücke zwischen fach- und populärwissenschaftlicher „Treibhaus-Literatur“ vielleicht hilfreich sind. Selbst in der Fachliteratur wird der naturwissenschaftliche Hintergrund oft nicht hinreichend deutlich. Er wird hier auf vereinfachende Weise quantifiziert, während besonders unsichere und in aktuellen Darstellungen besonders betonte Einfüsse nicht (explizit) berücksichtigt werden⁴⁷.

Während die Forcings aus den beiden vorangegangenen Abschnitten als Zusatzbeiträge zur kurzwelligen, solaren Strahlungsflussdichte in der Strahlungsgleichung (1) rechtsseitig zu addieren waren, ist das Forcing, das aus dem anthropogenen Treibhauseffekt resultiert, vom langwelligen Beitrag auf der linken Seite abzuziehen. Damit resultiert ebenfalls eine Ungleichung (entsprechend Gl.(1): links < rechts). Der Effekt ist primär durch infrarot-aktive, also mehr als zwei Atome enthaltende Gasmoleküle mit veränderlichem Dipolmoment bedingt [41]. Sie absorbieren einen Teil der von der Erdoberfläche ausgesandten Wärmestrahlung und tragen durch ihre Emission sowohl zur Oberflächenerwärmung durch Rückstrahlung als auch zur Abstrahlung in den Weltraum wesentlich bei (zusammen mit den Wolken).

⁴⁶Auch die Zahl der Autoren ist nicht nur für die IPCC-Berichte, sondern auch für viele der zu ihrem Verständnis notwendigen Originalarbeiten ungewöhnlich hoch (beispielsweise 42 für [38]). Die Umfänge der Publikationen, unter denen die Überschaubarkeit leidet, sind nicht zuletzt dem Streben nach Konsens und nach geringer Anfechtbarkeit der Darstellungen - auch von außerhalb der Wissenschaft - geschuldet.

⁴⁷Dazu gehört z. B. die Kryosphäre mit dem bereits von DÖPEL erwähnten Abtauen der Eisschilde, für die Nordhalbkugel verbunden mit einer Gefahr für Golf- und Nordatlantikstrom und mit einer Rückwirkung auf das globale Klima.

Die Berechnung des Forcings schließt an den natürlichen Treibhauseffekt an und nutzt die wohlbekannten Molekülspektren in eindimensionalen Strahlungstransportmodellen [9] für die Energieübertragung, wobei global über längen- und breitenabhängige vertikale Profile gemittelt wird [42]. So ergibt sich beispielsweise für das globale CO_2 –Forcing der vom IPCC ab [2-2001] übernommene Näherungsausdruck:

$$F_c = 5.35 \frac{W}{m^2} \ln \frac{[CO_2]}{280 \text{ ppmv}} . \quad (15)$$

In Abb. 1b (Abschnitt 2) entspricht die rechte, logarithmische Ordinatenskala dieser Funktion mit 280 $ppmv$ als vorindustriellem Startwert von 1750⁴⁸. Für 2005 beträgt das CO_2 –Forcing $F_c = 1.66 W m^{-2}$. Diesem größten Beitrag ist das insgesamt (anthropogen + solar) resultierende Forcing F_{res} praktisch gleich:

$$F_{res} = 1.6 W m^{-2} \approx F_c .$$

Alle übrigen Beiträge kompensieren sich zufälligerweise weitgehend, und der sich für F_{res} ergebende Unsicherheitsbereich ist um ein Mehrfaches größer als für F_c . (Vgl. [2], Fig. SPM 2.)

Die nächstkleineren positiven Beiträge liefern Methan, troposphärisches Ozon⁴⁹ sowie die bereits beim stratosphärischen Ozon mit Fußn. 15 erwähnten Halogenkohlenwasserstoffe, deren Verminderung die vorerst stärkste Verlangsamung des anthropogenen Treibhauseffektes gebracht hat. Den größten subtraktiven Beitrag liefern die Aerosole durch erhöhte Rückstreuung (direkt oder durch Wolken).

⁴⁸In den Jahren von 1000 v. Chr. bis 1750 variierte die Konzentration lediglich zwischen 275 und 285 $ppmv$ [2]. Daher werden 280 $ppmv$ gegenüber den manchmal (z. B. in [38]) stattdessen verwendeten 291 $ppmv$ von 1880 bevorzugt.

⁴⁹Zu deren Wechselwirkung sowie zu weiteren physikochemischen Aspekten des Treibhauseffektes siehe [14].

Wegen einer weiteren, knappen Diskussion der insgesamt 13 Beiträge sei z.B. auf [25] und auf [2] (FAQ 2.1) verwiesen.

Wichtiger als die aktuellen Forcing-Werte sind deren künftige Entwicklungen. Dafür sind auch die effektiven Lebensdauern [14] der jeweiligen Spezies maßgebend. Sie unterscheiden sich wegen deren unterschiedlicher chemischer Beständigkeit und atmosphärischer Verweilzeit um Größenordnungen⁵⁰. Zusammen mit den Naturgegebenheiten, zu denen auch unvorhergesehene Ereignisse wie Vulkanausbrüche gehören, bestimmen menschliche Aktivitäten die Entwicklung der Emissionen. In die politikabhängigen Emissions-Szenarien, von denen bereits ein breites Spektrum für die Computersimulation getestet wurde ([34],[2-2007]), sollte perspektivisch auch die Emission der Abwärme einbezogen werden.

Der letztendlich interessierende globale Temperaturverlauf wird nach der „*Forcing-Response-Beziehung*“ (12) in seiner Zeitabhängigkeit primär vom Forcing bestimmt. Der Sensitivitätsparameter λ war zwar ursprünglich als zeitlich unveränderlicher Proportionalitätsfaktor (wie in Gl. (9)) konzipiert, trägt aber im Allgemeinen ebenfalls zur Zeitabhängigkeit von ΔT_s bei. Vor allem aber hängt er vom jeweiligen Klimamodell ab. Zu seiner Berechnung müssen neben dem Strahlungstransport die Konvektionsprozesse mit dem Transport fühlbarer und latenter (Verdampfungs-)Wärme sowie mannigfaltige Rückkopplungen berücksichtigt werden.

Beispielsweise steigt, wie bereits zu Gl. (6) erwähnt, der Wasserdampfgehalt der Troposphäre entsprechend der H_2O –Dampfdruckkurve mit der Temperatur, was den Treibhauseffekt erheblich verstärkt⁵¹. Bei der Wechselwirkung

⁵⁰Als eine Hilfe für Vorhersagen gibt man das Globale Erwärmungspotential (GWP: *Global Warming Potential*) an, das auf CO_2 mit dem $GWP = 1$ bezogen wird. Es ergibt sich aus dem Produkt der effektiven Lebensdauer mit dem zeitlich integralen Forcing einer Masseinheit der jeweiligen atmosphärischen Spezies in Relation zu demjenigen von CO_2 . Durch Multiplikation mit der perspektivisch emittierten Masse ergibt sich die „Äquivalente CO_2 –Emission“. - Das Kyoto-Protokoll beruht auf den Werten für einen Zeitrahmen von 100 Jahren.

⁵¹Dies wird nicht beim Forcing berücksichtigt, weil H_2O als einziges Treibhausgas zugleich

mit dem Ozean ist hier außer dem ebenfalls bereits erwähnten Wärmeübergang auch der Stoffübergang zu berücksichtigen. Die Löslichkeit ist temperaturabhängig und beim CO_2 durch die Bildung von Kohlensäure und deren Dissoziation mitbestimmt [14]. Dadurch nimmt die Versauerung des Ozeans zu, wobei die Auswirkungen auf den marinen Kohlenstoffhaushalt noch sehr unsicher sind ([2]Box 7.3). - Die Prozesse in der Biosphäre werden generell noch mit Größen und Parametern vorgegeben und nicht - wie die geophysikalischen Prozesse - durch Systemgrößen beschrieben, die sich während der Simulation dem globalen Wandel anpassen können.

Im Unterschied zu den eindimensionalen Modellen, die im Zusammenhang mit Gl. (15) erwähnt wurden, dienen zur Klimasimulation dreidimensionale Zirkulationsmodelle ([9], Abschnitt 11.5; [14], Abschnitt 1.3.7). Die zugehörigen, umfangreichen Gleichungssysteme, die im Prinzip eine vollständige Beschreibung der physikalischen Prozesse enthalten, sind nur numerisch lösbar. Dafür sind höchste Rechenleistungen erforderlich (s. z. B. Fußn. 18). In Art und Ausmaß der Berücksichtigung physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse unterscheiden sich die Globalen Zirkulations-Modelle (GCMs) im Spektrum unterschiedlicher Komplexität ([2] Box TS.8).

Besonders für große Zeithorizonte bewähren sich „EMICs“ (*Earth System Models of Intermediate Complexity*), wie sie für Abb. 2b im Abschnitt 3.2 verwendet wurden. Insgesamt sind in [2] (Tab. 8.3 und Fig. 10.34) acht solcher Modelle für globale Simulationen bis zum Jahr 3000 eingesetzt worden. Sie stehen in der Hierarchie unterhalb der Atmosphäre-Ozean-Zirkulationsmodelle (AOGCMs) mit der höchsten Komplexität, die wegen ihres Rechenaufwandes im Zeithorizont relativ beschränkt sind und ihre Vorzüge z. B. bei den (hier nicht interessierenden) regionalen Betrachtungen zeigen. Für Fig. 10.34 in [2] lieferten sie Anfangsverläufe bis zum Jahr 2300, die bei der Temperatur

flüssig bzw. fest vorliegt. - Zum natürlichen Treibhauseffekt trägt H_2O zusammen mit den Wolken weit mehr als die Hälfte bei.

mehr im oberen Bereich der EMIC-Resultate liegen. Die Einbeziehung des Abwärme-Einflusses in solche Berechnungen und in die EMIC-Simulationen für die nachfolgenden Jahrhunderte dürfte mit den Großrechenzentren bereits heute möglich sein.

Das Klima der fernerer Vergangenheit, soweit es aus paläoklimatischen Daten erschlossen ist, wird heute in wesentlichen Zügen durch die Modelle erfasst und mit seinen Extremereignissen zu Testzwecken verwendet ([2], Abschnitt 9.3.4). Für das Industriezeitalter liefern Ensembles von Modellrechnungen Temperaturverläufe mit und ohne den anthropogenen Treibhauseffekt ([2], Fig. 9.5), wobei im letzteren Fall die Übereinstimmung mit den Messwerten zunehmend schlechter wird. Ab etwa 1970 laufen die Kurven wie eine Schere auseinander. Dabei schließen die höheren, beide Einflüsse erfassenden Verläufe aus unterschiedlichen Modellen auch weiterhin zutreffend den gemessenen Verlauf aus Abb. 1a (Abschnitt 2) ein, während die niedrigeren, nur mit den natürlichen Forcings berechneten Verläufe der Realität widersprechen. Das Vertrauen in die Vorhersagefähigkeit der Modelle wird durch diese Gegenüberstellung stark gestützt ([2], FAQ 2.1).

Alternativ zum *Klimasensitivitätsparameter* λ wird nicht selten (und vom IPCC fast nur noch) die *Klimasensitivität* S als Temperaturzunahme bei Verdopplung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration⁵² gegenüber dem vorindustriellen Wert (also auf 560 ppmv) angegeben. Speziell bei der Gleichgewichts-Klimasensitivität S^{gl} ([2], Box 10.2) legt man sich auf einen sogenannten Gleichgewichtsfall fest, in dem sich die Temperatur nach dem jeweiligen Modell nicht mehr merklich ändert. Dafür gilt mit Gl. (15)⁵³:

⁵²Entsprechendes gilt für die Äquivalent-Konzentration, die das gleiche Forcing hat wie eine vorgegeben Mischung von CO_2 mit anderen Treibhausgasen (und evtl. Aerosolen; siehe [2], SYR-Topic 2.1).

⁵³Für die anderen Treibhausgase gelten nach [42] ganz andere Funktionalzusammenhänge, was die Verallgemeinerung erschwert.

$$S^{gl} = \Delta T_{s,do}^{gl} = \lambda^{gl} \frac{W}{m^2} \cdot 5.35 \ln 2 = 3.7 \cdot \lambda^{gl} \frac{W}{m^2}. \quad (16)$$

S^{gl} und λ^{gl} ermöglichen von den Emissions-Szenarios unabhängige Vergleiche der unterschiedlichen Modelle, wobei S^{gl} anschaulicher ist. Aus zahlreichen Modellläufen und deren statistischer Auswertung ([2], Box 10.2) ergab sich, dass S^{gl} *wahrscheinlich*⁵⁴ zwischen 2 und 4.5 K und der *beste Schätzwert* bei 3 K liegt. Dies zeigt bereits, dass eine CO_2 –Verdoppelung höchst riskant wäre⁵⁵. Das entspräche einem Anstieg auf das 1.5-fache der gegenwärtigen Konzentration, der sich nur mit viel stärkeren Emissions-Reduzierungen hinreichend unterschreiten lässt, als sie bisher international beschlossen wurden. (Siehe Abschnitt 2 zu Kyoto.)

Der Kreis unserer quantitativen Ansätze schließt sich zur Gl. (6), die bereits im vorigen Jahrhundert - mit F_c anstelle von F_w - zur Berechnung der Sensitivität benutzt wurde (siehe z.B. [7, 33]⁵⁶). Mit $\lambda_e = 0.27$ und dem damals vom IPCC [2-1994] akzeptierten, vorlogarithmischen Faktor 6.3 (im Unterschied zu Gl. (15) mit 5.35) ergaben sich die manchmal auch heute noch verwendeten 1.2 K gegenüber dem einprägsamen, aktuelleren Wert

$$S_e = \Delta T_{e,do} = 1.0 K. \quad (17)$$

⁵⁴Die Wahrscheinlichkeit ist >66% nach der in Fußn. 1 genannten deutschen Zusammenfassung zur SPM [2].

⁵⁵Das Umweltbundesamt der BRD sieht selbst die niedrigsten CO_2 –Szenarien des IPCC ([2], Tab. TS.2) als inakzeptabel an und fordert 2 K als maximale Zunahme der Gleichgewichtstemperatur gegenüber vorindustrieller Zeit [43]. Angesichts der gegenwärtigen Renaissance von Braunkohle-Tagebauen und -Kraftwerken sind jedoch die entsprechenden Emissionsreduzierungen um mehr als 85% bis 2050 gegenüber 2000 sogar für Deutschland kaum realisierbar, auch ohne die Abkehr von der Kernkraft ([24], [36]).

⁵⁶GASSMANN deklariert S im Glossar als *Klimasensitivitäts-Parameter*, während z. B. in [38] umgekehrt λ als *Klimasensitivität* bezeichnet wird. Die Dimension schafft hier Klarheit.

Dieser rückkopplungsfreie Zunahme der effektiven Strahlungsgleichgewichtstemperatur T_e der Atmosphäre bei CO_2 –Verdoppelung steht der oben erwähnte, „beste Schätzwert“ von 3 K für $S^{gl} = \Delta T_{s,do}^{gl}$ gegenüber, und Werte unter 1.5 K gelten als *sehr unwahrscheinlich*⁵⁷. Dementsprechend wurde im Abschnitt 3.2 bei der Diskussion im Zusammenhang mit der „Oberflächen-Variante“ des DÖPEL-Modells zu Gl. (9) für ΔT_e der Faktor 3 bzw. 1.5 genannt, um auf Anhaltswerte der Oberflächentemperatur-Änderung mit Rückkopplungen zu kommen. Der letztere Wert führte auf ΔT_{ob} mit den punktierten Verläufen in Abb. 2c (Abschnitt 3.2), die als „sehr wahrscheinliche“, aktualisierte Untergrenze der Oberflächentemperatur-Änderung durch Abwärme gelten dürfen. Der wahrscheinlichen Obergrenze $S^{gl} = 4.5 K$, die zu Gl.(16) genannt wurde, entspricht ein Faktor 4.5 für ΔT_e , der immer noch wenig im Vergleich zum Kurvenschar-Parameter q ändert.

Dabei ist daran zu erinnern, dass diese Faktoren für den stoffspezifischen anthropogenen Treibhauseffekt des CO_2 abgeleitet wurden, bei dem z.B. auch der Stoffübergang zur Hydrosphäre mitspielt, während hier nur der Wärmeübergang zu berücksichtigen ist. Solche Unsicherheiten betreffen aber, was aus DÖPELS Darlegungen nicht hervorgeht, kaum die Größenordnungen seines Effektes für die globale Temperaturänderung auch an der irdischen Oberfläche.

Während die Gleichgewichtswerte S^{gl} und λ^{gl} *per definitionem* temperaturunabhängig sind, tritt bei den *effektiven Klimasensitivitäten* S^{eff} und den entsprechenden Parametern λ^{eff} schon wegen der Trägheit des Klimasystems eine zeitliche Veränderlichkeit auf, und zwar aktuell eine Zunahme⁵⁸.

⁵⁷Die Wahrscheinlichkeit liegt nach der in Fußn. 1 genannten deutschen Zusammenfassung zur SPM [2] unter 10% .

⁵⁸In [2] werden dazu z. B. im Abschnitt 10.7.2 Nichtlinearitäten in den Rückkopplungen bei AOGCMs diskutiert, und im Abschnitt 10.5.2.2 wird die Sensitivität für gewisse EMICs als *anpassbarer Parameter* betrachtet. - Die Beibehaltung der Forcing-Response-Beziehung (9) als Diskussionsgrundlage ist in solchen Fällen zweckmäßig, aber natürlich nicht zwingend.

Anschließend an eine Stabilisierung des Forcings ist noch eine Temperaturzunahme um $0.5 K$ und mehr zu erwarten, die hauptsächlich innerhalb der nächsten 100 Jahre eintritt ([2], Abschnitt TS.5.5). An den Verläufen in Abb. 2b (Abschnitt 3.2) nach der fiktiven Fixierung der CO_2 –Konzentration ab dem Jahr 2100 ist das gut zu erkennen. - Etwas realitätsnähere Stabilisierungsszenarien mit einem zwischenzeitlichen CO_2 –Konzentrations-Maximum nach der „*Grenzüberschreitung*“ [12a] werden in [2] vor allem im Abschnitt 10.7 untersucht⁵⁹.

Ein großer und grundsätzlicher Unterschied besteht in den Nachwirkungsdauern der Treibhausgas- gegenüber den Abwärme-Emissionen. Deren Forcing würde zusammen mit der Wärmeproduktion verschwinden, während vor allem das CO_2 sehr lange in der Atmosphäre verbleibt. Ein weiterer Unterschied liegt darin, dass die Abwärme unmittelbar wirksam wird, während bei den Berechnungen der atmosphärischen CO_2 –Konzentration aus den Emissionen noch erhebliche Unsicherheiten auftreten, vor allem wegen der Kenntnislücken beim globalen Kohlenstoffkreislauf ([2], SPM). Diese Unsicherheiten betreffen auch die erwähnten Stabilisierungs-Szenarien in [3], Abschnitt 10.7.

⁵⁹In diesem Zusammenhang kann eine Abschätzung zum gegenwärtig wirksamen anthropogenen Treibhauseffekt und zu seinen künftigen Auswirkungen nachgeholt werden. Im Anschluss an Gl. (15) wurde das Forcing, das gegenüber dem Beginn der Industrialisierung eingetreten ist, als $F_{res} = 1.6 W/m^2$ angegeben. Mit der zugehörigen Temperatursteigerung von $0.8 K$ führt dies auf ein $\lambda^{eff} = 0.5$ gegenüber $\lambda_e = 0.27 K \cdot m^2/W$ aus der Gl. (6), die keinerlei Rückkopplungen berücksichtigt. Diese können den Unterschied plausibel machen, der bei Berücksichtigung von Nachwirkungen noch größer würde. Einen Anhalt dafür bietet Tab. SPM.3 in [2], die als „beste Schätzung“ für den Fall konstanter Treibhausgaskonzentrationen ab dem Jahr 2000 einen Anstieg um $0.6 K$ vom späten 20. bis zum späten 21. Jahrhundert enthält. Dabei ist nach Fig. SPM.5 die Zunahme dann noch nicht beendet.

Die fiktive Stabilisierung der CO_2 –Konzentration⁶⁰ in Abb. 2a (Abschnitt 3.2) bei 700 ppmv bedeutet einen Faktor 2,5 gegenüber dem vorindustriellen Wert, der nach dem oben (vgl. Fußn. 55) zur Verdoppelung Gesagten extrem hoch ist. Im übrigen würde die Stabilisierung eine vollständige CO_2 -Entsorgung beim Einsatz fossiler Energiequellen voraussetzen, soweit sie nach 2100 noch verwendet werden. Solche Techniken werden unter der Bezeichnung CCS (*Carbon Capture and Storage*) derzeit getestet⁶¹, und unter dem Eindruck von drohenden oder bereits eingetretenen Klimaschäden wird sich zumindest in reichen Ländern wohl auch die Kostenfrage lösen.

Die Kohle reicht nach [2-2007] (WG III, Tab. 4.2) unter der Annahme eines konstanten Verbrauchs ab 2005 noch mehr als ein Jahrhundert, während Reste an Erdöl und -gas günstigenfalls für die Chemieindustrie reserviert bleiben. Zur Urankerspaltung reichen die Vorräte unter der gleichen Annahme noch etwa drei Jahrhunderte, und die Tiefenförderung von Erdwärme, die räumlich begrenzt ist, kann praktisch beliebig lange erfolgen.

Diese drei Quellen nicht-regenerativer Energie wären mit ihrer Abwärme für Abb. 2c (Abschnitt 3.2) zu berücksichtigen. Aber selbst bei 100%igem Einsatz regenerativer Energie, der zwar künftig vielleicht möglich wird, aber kaum zu erwarten ist (s. Abschnitt 4.1), würde man bei zunehmendem Energiekonsum nach Gl. (11) ebenfalls an Wachstumsgrenzen stoßen.

Für die EMIC-Modellrechnungen zu Abb. 2b (Abschnitt 3.2) aus [2] wurde die Abwärme nicht berücksichtigt⁶². Regenerative Energien wurden weder

⁶⁰Dabei wurden in [45] die übrigen Treibhausgas-Äquivalente einbezogen und auf ihren Werten von 2100 festgehalten. Die effektiven Lebensdauern (s. Fußn. 50) bleiben also unberücksichtigt. (In [44] wurde dazu noch nichts ausgesagt.) - Vulkanausbrüche wurden selbstverständlich ausgeschlossen.

⁶¹Beispielsweise wird die Abtrennung von CO_2 nach der Kohlevergasung in der Chemieindustrie seit langem bei der Wasserstoffherzeugung praktiziert und jetzt für den Kraftwerksbetrieb als „pre-combustion-Abscheidung“ erprobt. Zur dauerhaften Speicherung (*Sequestration*) gibt es u. a. Erfahrungen für das bei der Erdgasgewinnung in der Nordsee abgetrennte CO_2 [24].

⁶²Das CO_2 -bedingte ΔT_S aus Abb. 2b kann mit ΔT_{ob} aus 2c formal zu einem wahrschein-

stark bevorzugt noch ausgeschlossen⁶³. In [2-2007] ist unter der Überschrift „*Anthropogenic Heat Release*“ des Abschnitts 2.5.7 die (1998) aktuelle, globale Energieerzeugung von 0.03 W/m^2 erwähnt, die bereits im Abschnitt 3.2 genannt wurde. Im Unterschied zum urbanen Bereich wird ihr global kaum Bedeutung zugesprochen, ohne dass perspektivische Möglichkeiten erwähnt würden⁶⁴. Auch ist sie in einer Tabelle 2.13 aus [2] (mit zugehöriger Fig. 2.21) unter den anthropogenen Forcings nicht mit aufgeführt, obgleich darin noch deutlich kleinere Werte enthalten sind.

Es scheint, dass man seit den ausgewogeneren Diskussionen der 1970er Jahre (Abschnitt 2) angesichts der Zunahme des Treibhauseffekts und der damit verbundenen, akuten Probleme die Abwärme aus den Augen verloren hat. Darauf ist im Abschnitt 4.1 zurückzukommen, speziell auch im Zusammenhang mit Energieerzeugungs-Perspektiven des IPCC.

Hier sei noch eine kurze Gegenüberstellung der Wettervorhersage mit Prognosen des Klimas (als einem Langzeitmittel des Wetters) versucht, die beide dasselbe physikalische Gleichungssystem benutzen. Nach dem berühmten Mathematiker JOHN VON NEUMANN (1903-1957) bietet die Vorhersage des Wetters - nach derjenigen des menschlichen Verhaltens - das zweitschwierigste Vorhersageproblem [9]. 1963 leitete der Meteorologe E. W. LORENZ mit

lichen Mindestwert der gesamten Oberflächentemperatur-Zunahme summiert werden, während eigentlich ein Gesamt-Modell (zusammen mit einem gegenüber Abb. 2a wahrscheinlicheren EmissionsSzenarium) zur Überlagerung zu verwenden wäre. Mit dem von DÖPEL geforderten Übergang zu einer global stagnierenden Energieerzeugung würde sich auch im Gesamt-Verlauf eine Sättigung ergeben.

⁶³Das bis zum Jahr 2100 für alle 8 EMICs in Fig. 10.34 aus [2] benutzte Szenario A1B wird in [34] (Tab. TS-3) näher charakterisiert (s. a. Fußn. 36). Unter den drei Typen der A1-Familie nimmt es gegenüber dem *fossil-intensiven* und dem *nicht-fossilen* Typ eine moderate Stellung ein. Die A1-Familie wiederum steht unter den drei Familien, die in [2] für längerfristige Betrachtungen (z. B. zu Fig. 10.4) bevorzugt werden, als gemäßigt zwischen Fam. B1 und A2. (Vgl. auch [2-2007] WG II, Box 2.8.)

⁶⁴Ein Übergang zu insgesamt stagnierender (und nicht lediglich CO_2 -freier) Energieerzeugung, mit der die Projektionen aus Abb. 2b sinnvoller werden könnten, steht dabei nicht zur Debatte.

seinem einfachen Gleichungssystem eine stürmische Entwicklung der Wissenschaft vom Chaos ein (s. z. B. [7, 14]), die auch für die atmosphärische Dynamik maßgebend ist und die bekannten, grundsätzlichen Grenzen für die Wettervorhersage aufzeigt.

Solche Grenzen gelten jedoch - entgegen immer noch wiederholten Auffassungen - für die Klimaprognose bei gegebenen Emissionszenarien keineswegs. Als eine treffende Analogie aus der menschlichen Sphäre wird in [2] (FAQ 1.2) die Schwierigkeit der exakten Vorhersage des Sterbealters eines bestimmten Mannes der recht genauen Angebarkeit seiner mittleren Lebenserwartung (derzeit 76 Jahre in einem Industrieland als Szenarium) gegenübergestellt.

Allerdings hängen die Emissionsszenarien, die den zu einer Klimaprognose gebündelten Klimaszenarien zugrunde liegen, vom Menschen ab. Damit wird letztlich die für sein Verhalten bestehende Vorhersageproblematik nach v. NEUMANN wirksam, die zur Hauptsache ein Gegenstand nicht-naturwissenschaftlicher Disziplinen ist (s. Abschnitt 4.2). Im menschlichen Einfluss auf das globale Klima liegen einerseits wesentliche Unterschiede zum (höchstens regional beeinflussbaren) Wetter. Andererseits führt dieser Einfluss unter dem Prognose-Aspekt zu Gemeinsamkeiten mit den nahezu ebenso schwer vorhersagbaren Wetterphänomenen.

Der Abschnitt sei beendet mit Literatur-Hinweisen auf spannende Möglichkeiten der systemdynamischen Simulation, die sich auch auf das weitere Umfeld der Klimaproblematik (wie z. B. die Chaos-Dynamik nach LORENZ) erstrecken. Sie gelten vor allem Lesern mit Computer-Ambitionen und sind in dem breit angelegten Lehrwerk von HARTMUT BOSSEL [46] enthalten, das sich „auch als Handbuch für eigenständige Projektarbeit in Schule, Hochschule oder Forschung“ eignet (laut Vorwort). Zum engeren Problemkreis unseres Abschnitts 3.4 gehören Simulationsmodelle wie „Globaler Kohlen-

stoffkreislauf“ (Z 302) und mehrere nachfolgende Modelle zur Kohlendioxid-Problematik im „Systemzoo 2“. Weitere globale Probleme werden im „Systemzoo 3“ behandelt, u. a. basierend auf dem bekannten Modell WORLD 3 [12a]. Es geht dabei um Modelle, die zwar nicht so einfach wie das DÖPELSche sind, aber eher durchschaut und variiert werden können als die praktisch nur Experten zugänglichen, großen IPCC-Modelle.

4 Schlussbetrachtungen

4.1 Kernenergie?

ROBERT DÖPEL „war einer der ersten, der sich intensiv mit dem Gedanken der Kernverschmelzung beschäftigte und in dieser Richtung auch Versuche machte“ [32], und zwar noch vor den Leipziger Arbeiten zur Kernspaltung [4-C]. In der Einleitung zu [3] konstatierte er, dass die Verfügbarkeit der herkömmlichen Energiequellen und der Kernspaltungsmaterialien die industrielle Energieproduktion in einigen Jahrhunderten beschränken könnte, während Fusionsmaterialien weitaus länger verfügbar sind.

Das bis heute für die Fusion wichtigste Prinzip mit der russischen Abkürzung TOKAMAK wurde 1952 von I. J. TAMM zusammen mit A. SACHAROW, dem nachmaligen Menschenrechtler und Friedensnobelpreistäger (1975), kreiert. Dieser war zugleich am sowjetischen Nachbau der amerikanischen Wasserstoffbombe beteiligt, die auf dem gleichen physikalischen Vorgang basiert und zu deren Zündung die Kernspaltungsbombe diente. Ohne derartige Zündung, d. h. im künftigen Fusionsreaktor, besteht kein Sicherheitsrisiko, das einer Kernschmelze im Spaltungsreaktor vergleichbar wäre, wie sie in Tschernobyl eintrat⁶⁵.

Eine Stromerzeugung im Fusionskraftwerk wird, wenn die aussichtsreichen Tests erfolgreich verlaufen, ab Mitte unseres Jahrhunderts erwartet ([49];

⁶⁵Die wahrscheinliche Ursache der Tschernobyl-Katastrophe von 1986 hat MICHAEL GORBATSCHOW, der im Jahr zuvor an die KP-Spitze gelangt war, im Anhang zu seinem 2003 erschienenen Umwelt-Buch [47] wiedergegeben. Danach wurde die Kernschmelze durch ein eigenmächtiges Experiment des wissensdurstigen Kraftwerksdirektors für eine kerntechnische Abhandlung ausgelöst und nicht, wie oft vermutet, durch das „von oben“ angeordnete Nachholen einer früher versäumten Sicherheitsprüfung. - Im Zusammenhang mit der sowjetischen Kerntechnik sei erwähnt, dass ein späterer Mitstreiter GORBATSCHOWS bei der *Perestroika*, der international bedeutende Schriftsteller DANIIL GRANIN [48], 1973 wegen eines Filmprojekts über die friedliche Nutzung der Atomspaltung ROBERT DÖPEL in Ilmenau aufgesucht hat.

[2-2007] WG III Tab. 4.2). Da die Reaktorentwicklung nur weitgehend empirisch und schrittweise mit immer größeren Anlagen voranzutreiben ist⁶⁶, werden dazu jährlich $10^9 - 10^{10}$ Euro verbraucht. Dabei ist der internationale Konsens und auch das Zusammenwirken sehr ausgeprägt⁶⁷ ([49, 50]).

Sollte der Strompreis schließlich ähnlich niedrig werden wie bei der Kernspaltung [24], so wären wieder deutlich höhere Wachstumsraten denkbar, als sie bis 2050 zu Gl. (10) genannt wurden. Bereits für ein mittleres $q = 1.05$, also immer noch geringeres Wachstum als zur Zeit der Prognose DÖPELS, würde nach Abb. 2c (Abschnitt 3.2) bereits gegen Ende unseres Jahrhunderts die Abwärme für die globale Temperatur merklich.

Wenn das Vorbild des Westens, der seinen Energieverbrauch nicht ohne große Not drosseln wird, bei wachsender Bevölkerungszahl weltweit wirksam bleibt und für den Pro-Kopf-Verbrauch angestrebt wird, ist ein beliebig lieferfähiges Energiereservoir für kommende Generationen problematisch. Dann könnten Fusionsreaktoren die gleiche Rolle bei der globalen Erwärmung spielen wie derzeit die fossilen Kraftwerke. Grundsätzlich gilt, dass die Fusion zwar zur Überbrückung bei der CO_2 -Vermeidung erstrebenswert ist, aber dann die Wachstumsgrenzen um so mehr beachtet werden müssen, die im Anschluss an Gl. (11) diskutiert wurden. Es zeigt sich hier ein weiteres Mal, dass die nächsten Jahrhunderte im Interesse der viel beschworenen Nachhaltigkeit mehr Aufmerksamkeit verdienen.

Trotz ihrer praktisch unerschöpflichen Rohstoffbasis ist die Fusion nicht nur wegen der radioaktiven Abfälle, sondern vor allem auch wegen ihrer Abwärme-Emission keine nachhaltige Technik, als die sie jedoch in der Öffentlichkeit

⁶⁶Eine zeitsparende Vorausberechnung wird vor allem durch Turbulenzen mit chaotischen Instabilitäten der Plasmen erschwert, in denen die Fusion erfolgt.

⁶⁷Dies ist umso bemerkenswerter, als dies für die solarthermische Kraftwerkstechnik, die noch stärker auf internationale Zusammenarbeit angewiesen ist, bisher weit weniger entwickelt ist (s. Fußn. 42). Auch mangelt es hierfür an finanziellen Vorleistungen, die bei weitem nicht so hoch sein müssten wie bei der auf die genannten Summen angewiesenen Fusion.

und auch in der Fachwelt weithin gilt. Als die bessere Alternative wurde sie sogar von derjenigen Bundesregierung, die eine vorzeitige Abschaltung der Kernspaltungskraftwerke beschloss, ebenso wie zuvor und danach mit sehr hohen, für die Realisierung sicherlich notwendigen Summen gefördert. Weit niedriger liegen jedoch die Summen für alle regenerativen, d.h. wirklich nachhaltigen Energietechniken zusammen⁶⁸. Diese tragen aber im Unterschied zur Fusion bereits jetzt, wenngleich noch viel zu wenig, zur Minderung der aktuellen CO_2 -Probleme bei.

Wegen der besonderen Risikowahrnehmung [14] in Deutschland für die Kernspaltungstechnik wird der Rest dieses Abschnitts dieser Problematik gewidmet. Die bereits begonnene, vorzeitige Abschaltung der CO_2 -freien Kernkraftwerke, die in der Welt einmalig ist, hat angesichts der globalen Erwärmung kaum Chancen auf eine Vorbildwirkung (im Sinne des Zitats vom Ende des Abschnitts 2). Dazu wäre z. B. die Gefährdung vieler Menschen in den Marschniederungen und Küstenstädten armer Länder durch den Meeresspiegelanstieg gegen besondere deutsche Befindlichkeiten, die durch große Angst und Besorgnis mitbestimmt sind, abzuwägen. Von naturwissenschaftlicher Seite ist zu ausgewogeneren Informationen beizutragen und auf fragwürdige Weichenstellungen aufmerksam zu machen.

Nach der DPG-Stellungnahme von 2005 [24] sollten vor allem die deutschen CO_2 -Minderungsziele („minus 40% bis 2020“) nicht gefährdet werden, während an den Laufzeitbefristungen für Kernkraftwerke, die deutlich unter der technischen Lebensdauer liegen, festgehalten wird. Die auf den Zeitraum bis 2020 begrenzte Studie stellt die Aufhebung dieser Befristungen als zweite Hauptforderung neben die Solarthermie (Abschnitt 3.2).

Dabei macht sie bewusst keine Aussage für oder gegen neue deutsche KKWs,

⁶⁸Der Unterschied kann wegen der sowohl nationalen als auch EU-weiten Förderung, vor allem aber wegen der unterschiedlichen Förderinstrumente (aus Steuern bzw. direkt über die diversen Strompreise) schwer beziffert werden.

die den Konsens in der Physikalischen Gesellschaft wohl gefährdet hätte. Bereits die Aussage gegen die Laufzeitbeschränkung ist angesichts einer „*überkritischen Öffentlichkeit*“ ([24], Leitartikel) gewagt⁶⁹. Es wird darauf verwiesen, dass „*auf absehbare Zeit von keiner Seite entsprechende Investitionsentscheidungen angestrebt werden*“.

Inzwischen erfolgen aber große Ersatzinvestitionen mit Braunkohle (Fußn. 55), wobei die Investitionszyklen in der Energiebranche bei 30 und mehr Jahren liegen. Im übrigen wird ein deutsches Stromdefizit mit durch Import aus (evtl. zusätzlich gebauten) KKWs der Nachbarländer gedeckt werden, so dass sich in Europa insgesamt bei der Kernkraft wenig ändert [51].

Allerdings spricht gegen eine generelle Aufhebung der Laufzeitbefristungen, dass die Gefahr einer Kernschmelze weit weniger wegen technischem oder menschlichem Versagen als wegen der Möglichkeit terroristischer Aktionen [52] zu fürchten ist. Insofern erscheint die Ablehnung eines Beschlusses zur Abschaltung der wenigen, nicht hinreichend gegen einen Flugzeugabsturz geschützten Kernkraftwerke durch den zuständigen Bundestagsausschuss (2008) als inkonsequent.

Die Kernschmelze ist im *Kugelhaufenreaktor*, einem Hochtemperaturreaktor mit kugelförmigen Brennelementen, praktisch ausgeschlossen. Er wurde in Deutschland entwickelt und in zwei Varianten bis 1988 betrieben, wobei zuletzt niedrig angereichertes statt des hoch angereicherten, waffentauglichen Urans verwendet wurde [53]. Unter Beteiligung deutscher Firmen wird er u. a. in den Niederlanden sowie in Südafrika weiterentwickelt, und China plant, bis 2020 dreißig solcher Reaktoren zu bauen.

⁶⁹Beispielsweise wird in der für diese Öffentlichkeit bestimmten, grundlegenden Schrift von HARTMUT GRASSL zum anthropogenen Klimawandel [25] keinerlei Aussage zur Kernenergie gemacht. Allerdings werden die von ihm mitgetragenen IPCC-Berichte hervorgehoben (s. Fußn. 20 und Ende dieses Abschnitts).

Auch in den USA stehen Entscheidungen über diesen Reaktortyp an, wenn wieder Kernkraftwerke gebaut werden.

Man hat vom Kugelhaufenreaktor als einer in der BRD „verpassten Chance“ für die Energieerzeugung gesprochen [53]. Aber die Gefahren des Austretens radioaktiver Materie und die Entsorgungsproblematik der Abfälle (s. Ende Abschnitt 3.2), die vermindert auch bei Fusionsreaktoren zu erwarten sind, bleiben bestehen. Vor allem aber ist es die Gefahr der Weiterverbreitung von Kernwaffen, die z. B. das IPCC (in [2-2007], WG III, Abschnitt 4.3.2.3) eine sehr zurückhaltende Position zum Ausbau der Kernspaltungstechnik einnehmen lassen. Gegen deren Neubeginn in Deutschland spricht auch und vor allem diese Gefahr⁷⁰.

4.2 Der Klimawandel und die „andere Kultur“

In einem klimapolitischen Statement des energietechnologischen EU-Beraters GERD EISENBEISS [36], der früher dem Großforschungszentrum Jülich vorstand, finden sich harte Worte gegen den Lebensstil und Energieverbrauch der „privilegierten Milliarde der Industrieländer“. Werbung für Konsum müsse „wohl unterbunden werden“, und es sei eine neue Freizeitkultur zu entwickeln. Noch härter hat bereits ROBERT DÖPEL radikale Einschränkungen des (Energie-) Konsums gefordert. In seiner typischen Art, an die man sich gern erinnert⁷¹, schrieb er dazu [3]:

⁷⁰Bei der Aporie mit Teufel und Beelzebub, von denen z. B. in der Diskussion zur DPG-Studie [24] seitens des deutschen Umweltbundesamtes (Fußn. 55) die Rede war, muss das CO_2 als der eine von beiden im Verlauf einer Übergangsphase unter Mitwirkung des anderen, also der Kernspaltung, weitgehend ausgeschaltet werden. Am Ende darf dieser natürlich ebenso wenig triumphieren wie bei der Wette mit dem Herrgott im „Faust“.

⁷¹Treffend und ausführlich hat diese Art und den menschlichen Reichtum DÖPELS, besonders auch in Hinsicht auf die „andere Kultur“, J. KLEIN als ein früherer Ilmenauer Doktorand beschrieben [54]. Schon in jungen Jahren liebte DÖPEL philosophische Gedankengänge, wie der Freund HANLE [32] in seinen Memoiren aus der gemeinsamen Göttinger Zeit berichtet: „Er war nicht nur ein guter Physiker, sondern auch ein großer Philosoph vor dem Herrn.“ An anderer

„Wer aber meint, dass darunter auch die weitere Entwicklung aller Kultur zu leiden habe, der sollte sich doch mal fragen, wie viele Kilowattstunden nötig waren, um z. B. die Kultur der Zeit von Beethoven und Goethe zu schaffen!“

Dabei war „die Kultur“ in der östlichen Hemisphäre immer noch gegeben durch die Künste und die zugehörigen Wissenschaften⁷². Im Westen spricht man demgegenüber seit 1959 mit dem Physiker und Romancier CHARLES PERCY SNOW von (mindestens) zwei Kulturen, die sich um die Natur- und um die Geisteswissenschaften gruppieren⁷³ und deren trennende Kluft vermindert werden soll. Diese besteht seit der Zeit von BEETHOVEN und von GOETHE, der als Dichter mit seinen umfassenden naturwissenschaftlich-technischen Kenntnissen und Ambitionen zuletzt die Einheit der Kultur verkörperte. Daran anknüpfend, leistete in Deutschland seitens der Naturwissenschaft besonders WERNER HEISENBERG⁷⁴ „einen wichtigen Beitrag ... zur Überwindung der Kluft zwischen Natur- und Geisteswissenschaften - ein Ziel, das Goethe sicher vorschwebte.“ So endet eine Abhandlung des Physikers und Wissenschaftshistorikers RECHENBERG [55].

Für AL GORE [1] ist diese große Kluft ein Hauptproblem „beim Nachdenken über die Klimakrise“, und in einer vertiefenden Darstellung [56] hat er

Stelle hat er seinen Freund als einen „Gerechtigkeitsfanatiker“ charakterisiert. Dieser Charakterzug und seine „Offenheit ohne Ansehen der Person“ [4-D] haben ihm zum eigenen Leidwesen [54] nicht wenige Schwierigkeiten eingebracht. (Vgl. Fußn. 28 u. 40.)

⁷²In Ostdeutschland gab es vielerorts die „Kulturwissenschaften“, die teilweise versuchten, sich gegenüber den ideologisch noch stärker überfrachteten Gesellschaftswissenschaften zu profilieren. Der herkömmliche Begriff „Geisteswissenschaften“ wurde, ebenfalls aus ideologischen Gründen, vermieden.

⁷³Bei der ersten Gruppe könnte man von den MINT-Fächern (Fußn. 6) sprechen, aus deren Sicht die übrigen Fächer zusammen mit Kunst und Literatur zur „anderen“, der geisteswissenschaftlichen Kultur gehören. Selbst bei dieser schlichten Darstellung ist klar, dass die Mathematik ebenso wenig eine Naturwissenschaft ist, wie die Sozialwissenschaft zu den Geisteswissenschaften gehört. Sie wird manchmal als eine besondere, dritte Kultur gezählt.

⁷⁴Er gehörte in der Zeit des Eisernen Vorhangs dem Vorstand der gesamtdeutschen Goethe-Gesellschaft in Weimar als bundesdeutscher Vertreter an, auch um zur Verminderung der politischen Kluft beizutragen. In diesen Zusammenhang gehört auch der in Fußn. 27 erwähnte Festvortrag zur Hauptversammlung 1967 [30].

u. a. die Beratungsresistenz von Entscheidungsträgern untersucht. Der tschechische Staatspräsident VÁCLAV KLAUS sieht in seinem kontroversen Buch [57] die Freiheit durch die Klimadebatte bedroht. Der Anhang enthält für ein Hearing des US-Kongresses seine konträren Thesen zu denjenigen von AL GORE sowie seine Rede auf der UNO-Konferenz zum Klimawandel 2007, die sich gegen das „*einseitige Monopol*“ des IPCC und seine Aussagen richtete. Laut Vorwort ist die globale Erwärmung „*mehr eine Angelegenheit der Gesellschaftswissenschaften als eine der Naturwissenschaften*“.

Ähnliches steht im Epilog des - weit gründlicheren und ausführlicheren - Buches eines Historikers [58] im Zusammenhang mit problematischen Datierungsmethoden für die Erdgeschichte:

„Nur über die historische Chronistik ist es möglich, die 'exakten' Naturwissenschaften auf die richtige Bahn zu bringen. Geisteswissenschaftler - das sei zum Jahr der Geisteswissenschaften gesagt - sind ein solches Ausmaß an Unexaktheit nicht gewöhnt.“

Im Text werden „*Schläge gegen das Klimamärchen*“ geführt, und das Ozonloch wird unter die überflüssigen „*ökologischen Ängste*“ eingeordnet. (Vgl. Fußn. 2.) Dabei ist für Prognosen von Klimafolgen prinzipiell der Ansatz einer *Kulturgeschichte* - beispielsweise für das Mittelalters mit seinem klimatischen Auf und Ab - wichtig, wenn man Betrachtungen bis zum Ende unseres Jahrtausends anstellt.

Solchen Beispielen für die immer noch bestehende Kluft zwischen den beiden Kulturen steht eine universitäre Initiative zu deren Kooperation auf dem Klima-Sektor gegenüber [59]. Als die Erben der Geistes- treten dabei die Kulturwissenschaften auf⁷⁵, und zwar nach wie vor in Allianz mit den Sozialwis-

⁷⁵Diese an die „*cultural studies*“ angelehnte Bezeichnung (vgl. auch Fußn. 72) wurde nach 1990 deutschlandweit etabliert. Zur Gegenüberstellung mit den Naturwissenschaften darf man sich wohl auf die *Geisteswissenschaften* zurückziehen, die dem Jahr 2007 immerhin noch seinen regierungsamtlichen Wissenschafts-Namen gaben.

senschaften (s. Fußn. 73), die für Klimaprognosen und zur Bewältigung der Klimakrise besonders wichtig sind. Solche Initiativen sollten schon deshalb mehr öffentliche Aufmerksamkeit und Zuwendung erhalten, wofür nicht zuletzt die Aktivitäten der Naturwissenschaftler gefragt sein werden. Dies gilt besonders auch für Deutschland, wo derartige Bestrebungen eher rückläufig sind⁷⁶. In diesem Zusammenhang ist das 50-jährige Jubiläum des SNOW-Vortrags über die „Zwei Kulturen“ im Jahr 2009 zu erwähnen, das vor allem in den angelsächsischen Ländern vorbereitet wird.

Am Ende dieser Abhandlung sollen die Gedanken vom Anfang des laufenden Abschnitts nochmals aufgegriffen werden. Ganz im Sinne der beiden Artikel, aus denen dort zitiert wurde, hat der studierte Volkswirt und promovierte Politikwissenschaftler KLAUS TÖPFER in seiner „Weimarer Rede“ vom April 2008⁷⁷ eine „erhebliche Veränderung unseres Verbraucherverhaltens“ vorhergesagt und eine stärkere „Rückbindung in Kultur“ angemahnt. Zu globaler Solidarität und Umweltethik verwies er auf das „Welt-Ethos“ des Theologen und Philosophen HANS KÜNG [62].

Angesichts der Auswirkungen entgrenzter Finanzströme [63] sah er „ungezügelt globale, dramatische Folgen für die wirtschaftliche Stabilität und die Lebensbedingungen“, und die seither eingetretene Entwicklung unterstreicht die Forderung nach einer Überprüfung seitens der UN, „inwiefern leistungsfähige Frühwarnsysteme drohender Katastrophen deren Vermeidung möglich werden lassen“. Er hob aber auch „die großen Chancen für Wissenschaft und Forschung, für wirtschaftliche Anwendungen und Exporterfolge“ und damit

⁷⁶Im Zuge der Reformierung und Reduzierung der Geisteswissenschaften wurden auch die Lehrstühle für Geschichte der Naturwissenschaft (und verwandter Gebiete) an den universitären Fakultäten des vereinigten Deutschlands weiter vermindert. Diese „geborene Klammer zwischen den beiden Bereichen Natur- und Geisteswissenschaften“, wie sie ein Rektor aus Ostdeutschland nannte [60], war dort bereits um 1970 einer Hochschulreform teilweise zum Opfer gefallen.

⁷⁷Die Reden [61] fanden, was TÖPFER als „hoch bedeutsam und wohl begründet“ bezeichnete, im Deutschen Nationaltheater statt. Die Laudatio des Intendanten, die vor seiner Rede abgedruckt ist, nennt dessen weltweite Aktivitäten. Auch die Laudatio zu und die Rede von GABRIELE KRONE-SCHMALZ, aus der im Vorspann dieser Arbeit zitiert wurde, sind hier zu finden.

für den Arbeitsmarkt hervor, die sich bei richtiger Reaktion auf den Klimawandel besonders für Deutschland aufturn.

Des weiteren betonte er die gegenwärtige „*Renaissance des Regionalen*“ sowie deren Bedeutung und Notwendigkeit für die kulturelle Identität. In diesem Sinne ist für die Universität und die Region Ilmenau auf die vergleichsweise wenig genutzten Möglichkeiten zu verweisen, an das Wirken von ROBERT DÖPEL dauerhaft zu erinnern⁷⁸, der hier als der - zumindest auf physikalisch-technischem Gebiet bedeutendste Wissenschaftler seine letzten 25 Lebensjahre verbrachte⁷⁹. Seine Lebensleistung ist noch höher zu bewerten, wenn man die gesellschaftspolitischen Umstände mit Krieg (bei schwerer Verwundung 1918) und Kriegsgefahr berücksichtigt, unter denen er den größten Teil seines Lebens zubrachte, und sie denjenigen der Gegenwart mit ihren reichen Möglichkeiten gegenüberstellt.

In dieser Gegenwart plädiert KLAUS TÖPFER dafür, „*offen zu sein für die bunte, die vielfältigere Gesellschaft in der globalisierten Welt*“ und die Zukunft „*wo immer möglich aktiv mitzugestalten*“. Oder mit KARLHEINZ BÖHM, einem anderen großen internationalen Akteur [64]:

„*Wichtig ist, dass man etwas tut. Und die Welt nicht so akzeptiert, wie sie ist.*“

⁷⁸Zuletzt fand 1995, als sich DÖPELS Geburtstag zum 100. Mal jährte, an der TU und an der neu gestalteten Grabstätte auf dem Ilmenauer Friedhof eine Gedenkfeier mit der Rektorin DAGMAR SCHIPANSKI statt. Außer einer aus persönlichem Erleben schöpfenden Ansprache von CHRISTOPH SCHNITTLER als dem *spiritus rector* wurden zwei Vorträge von Leipziger Kollegen gehalten: Der eine von MANFRED HÖTZEL mit dem gleichen Titel wie in [4-E] und der andere von DIETMAR LEHMANN in Anlehnung an [4-C, 27]: „*Der Kernphysiker Robert Döpel*“. - Berichte über die Veranstaltung und ihre Vorbereitung in den *Ilmenauer Uni-Nachrichten* 39/1/96 u. 38/4/95, abrufbar unter <http://zs.thulb.uni-jena.de/content/main/journals/iun.xml>.

⁷⁹An seinen früheren Doktoranden KLEIN (vgl. Fußn. 71) schrieb er einmal aus Ilmenau: „*Urlaub im eigentlichen Sinne habe ich auch in diesem Jahr nicht gemacht. Wir leben ja hier in einem 'Luftkurort' ...*“.

5 Zusammenfassung

(Auf eine komprimierte englische Darstellung, die vor allem die aktualisierten Ergebnisse des DÖPEL-Modells den IPCC-Rechnungen von 2007 gegenüberstellt, wurde bereits in Fußn. 5 verwiesen.)

Zur geschichtlichen Einordnung der Modellbetrachtungen für die globale Erwärmung wird zunächst, mit der Entdeckung des Treibhauseffekts beginnend, ein kurzer Abriss des Diskussionsverlaufs und des Sachstands zum Klimawandel bis heute gegeben. Die Gegenüberstellung der seither beobachteten Temperaturen mit dem Verlauf der atmosphärischen CO_2 -Konzentrationen zeigt nur andeutungsweise eine Korrelation, wie sie heute für sehr viel längere Zeiträume deutlich geworden ist. Dies macht verständlich, dass ROBERT DÖPEL in seiner Arbeit zum Abwärme-Einfluss von 1973 die widersprüchlich diskutierte, anthropogene Verstärkung des Treibhauseffekts ignoriert hat.

Um einerseits die Klima-Arbeit in DÖPELS Lebenswerk einzuordnen und andererseits seine herausragende Bedeutung für deren Entstehungsort Ilmenau und dessen Universität zu illustrieren, werden die wichtigsten Phasen seines Wirkens skizziert, beginnend mit der ersten Professur in Leipzig. Dort erzielte er zusammen mit seiner Frau und mit W. HEISENBERG, der die theoretischen Grundlagen und Entwürfe bereitstellte, erstmals eine effektive Neutronenvermehrung bei der Kernspaltung, wie sie für deren energetische Nutzung erforderlich ist. Angesichts der umfangreichen, aus der Leipziger Universität veröffentlichten Materialien, die auch die Ilmenauer Zeit betreffen, wurde hier keine biographische Vollständigkeit angestrebt und lediglich Ergänzendes oder auch Korrigierendes gebracht.

Mit seinem geophysikalischen Modell von 1973 behandelte DÖPEL den Einfluss der anthropogenen Abwärme auf künftige Temperaturen, vor dem auch in anderen Darstellungen aus dieser Zeit gewarnt wurde, z. B. ein Jahr später

vom *Club of Rome*. Seither wird dieser Einfluss jedoch weitgehend ignoriert. Im Bericht des UN-Klimarates IPCC von 2007 wird er im globalen Maßstab lediglich als derzeit vernachlässigbar erwähnt, und er fehlt selbst bei Projektionen der Treibhaus-Wirkung bis zum Ende unseres Jahrtausends. Bis dahin erstrecken sich die Modellrechnungen DÖPELS, die dabei mit weiter zunehmender, nicht-regenerativer Energieerzeugung berücksichtigt werden müssten, wie die Gegenüberstellung der Graphiken zeigt. Deren Basis musste mit einiger Ausführlichkeit dargestellt werden, wobei für den anthropogenen Treibhauseffekt kompliziertere Sachverhalte zu berücksichtigen waren.

DÖPEL geht, wie die bestechend einfache Herleitung zeigt, von der bekannten globalen Strahlungsbilanz mit der STEFAN-BOLTZMANN- und der Solar-Konstanten aus. Der natürliche Treibhauseffekt wird dabei nur implizit berücksichtigt. Für biologisch diskutabile Temperaturerhöhungen von nur einigen K ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang mit dem Forcing als einer Triebkraft für die Erwärmung. Mit abgewandelten Proportionalitätskonstanten dienten solche Zusammenhänge auch bei späteren, komplexeren Modellen für die Computersimulation als vereinfachende Interpretationsgrundlage. Dieser Aspekt, der auf das Forcing-Konzept aufbaut, dient als roter Faden für die quantitative Durchdringung umfangreicher Materialien zur globalen Erwärmung, in denen derartige Grundkonzepte unterschiedlich gehandhabt und oft als bekannt vorausgesetzt werden.

Die Modellrechnungen zum anthropogenen Treibhauseffekt aus dem IPCC-Bericht von 2007 reichen lediglich im oben erwähnten Beispiel, das ein fiktives Emissionsszenarium verwendet, bis zum Jahr 3000, und sie gehen nur in wenigen weiteren Fällen über das Jahr 2100 hinaus. Um diese Zeit ist frühestens eine zusätzliche Temperaturerhöhung durch die Abwärme zu erwarten, wie aktualisierte Modellrechnungen zeigen. Dazu wurde mit DÖPEL exponentielles Wachstum der Erzeugung nicht-regenerativen Energie für unterschiedliche Steigerungskoeffizienten angesetzt. Seit dem Startjahr 1970 für

seine Rechnungen betrug die Wachstumsrate 2% pro Jahr, etwa 1/3 des damaligen Wertes. Bei dessen Beibehaltung hätte sich bereits in der Mitte unseres Jahrhunderts ein Mindestbeitrag von +1 K zur globalen Temperatur ergeben, und zwar zusätzlich zur Auswirkung des Treibhauseffektes, die bereits demnächst diesen Wert erreicht. Bei 2% Abwärme-Zunahme jährlich würde diese Größenordnung 2 Jahrhunderte später eintreten und bei 0.5% erst gegen Ende unseres Jahrtausends.

Zu dieser Zeit wären, wenn die 0.5%-Zunahme stattdessen ausschließlich mit Solarenergie erzielt würde, deren Gewinnungsmöglichkeiten bereits am globalen Limit, wie sich aus den von DÖPEL abgeschätzten Wachstumsgrenzen ergibt. Seine Modellbetrachtungen zeigen, dass - zwischen dem Zeithorizont von Jahrzehnten für die Treibhausdiskussion und den Forderungen nach Sicherheit radioaktiver Endlager für eine Jahrmillion, die aus radioaktiven Abklingzeiten abgeleitet sind, - dem Zeithorizont weniger Jahrhunderte mehr Aufmerksamkeit gebührt. Innerhalb solcher Zeiträume könnte mit einer künftigen Kernfusionstechnik die Wachstumsgrenze für die Globaltemperatur erreicht werden, die durch die Abwärme bedingt ist.

Während der zeitliche Horizont bei den üblichen Kernenergie-Diskussionen extrem groß ist, wird der Raumhorizont, z. B. in der BRD im Zusammenhang mit der Abschaltung der KKWs, oft auf das nationale Gebiet beschränkt. Jedoch ist wegen der armen und von den Klimafolgen am ehesten betroffenen Völker, deren Migrationsbewegungen bereits begonnen haben, ein globaler Raum- und Verantwortungs-Horizont angebracht. Natürlich gilt dies auch für die Kernwaffen-Gefahr, die gegen einen Ausbau der Energiegewinnung mit Spaltungsreaktoren spricht.

Wiederum an Überlegungen DÖPELS anknüpfend und mit kritischer Betrachtung der seither eingetretenen Entwicklung, wurden zuletzt geistig-kulturelle Aspekte einer Änderung des Lebensstils im Sinne der Nachhaltigkeit erör-

tert. Störungen im Verhältnis von natur- und geisteswissenschaftlicher Kultur bei klimarelevanten Fragen wurden ebenso benannt wie sozialwissenschaftliche Ansätze zur Problemlösung. Sie müssen ausgebaut werden, damit nicht nur die Zivilisation, sondern auch die zugehörige Kultur vor Rückschlägen bewahrt wird, wie sie schon in der Vergangenheit zu den beschriebenen Defiziten bei der Bekämpfung des Klimawandels geführt haben.

Dessen nachhaltige Eindämmung ist, solange der Energiekonsum überhaupt wächst, weder mit Fusionskraftwerken noch mit regenerativen Energiequellen möglich, so wichtig diese für eine Übergangszeit von wenigen Generationen auch sind. Danach darf die Energieproduktion nicht mehr gesteigert werden, worauf man sich im Sinne DÖPELS bereits lange vorher einstellen sollte.

6 Dank

Zuerst ist bereits verstorbener Kollegen zu gedenken. Der befreundete Fachkollege FRIEDRICH KOHLER hat mit mir seit 1960 über die „globalen Probleme“ der Umwelt heiß diskutiert und mich aus Wien mit einschlägigen Schriften, z. B. von den dortigen Pugwash-Konferenzen und besonders auch zu Klima-Fragen, versorgt. In Ilmenau hat - etwa zur gleichen Zeit wie ROBERT DÖPEL - der namhafte Kybernetiker und Systemtechniker KARL REINISCH solche Probleme aufgegriffen. In freundschaftlicher Zusammenarbeit, in der ich den naturwissenschaftlichen Part bestritt, haben wir sie ab dem Ende der 1970er Jahre in die Lehre einbezogen, wobei auch das DÖPEL-Modell zu seinem Recht kam.

Ohne die Unterstützung meiner Frau wäre diese Abhandlung nicht möglich gewesen. Unsere drei Söhne wirkten ebenfalls motivierend, und sie haben aus mathematischer, naturwissenschaftlicher und technischer Sicht Beiträge geliefert. Frau D. BÖHME hat die Textgestaltung und Frau A. CHALL Diskussionen mit Korrekturen beigesteuert. Die Damen und Herren vom Universitätsverlag Ilmenau waren ebenfalls sehr hilfreich und sorgten für eine förderliche Zusammenarbeit.

Ihnen allen sage ich auch hier meinen herzlichen Dank.

Ilmenau, am Jahresende 2008.

Literatur

- [1] Gore, A., Paramount 2006, *EINE UNBEQUEME WAHRHEIT - Eine globale Warnung*; auch als DVD. Dazu das Buch *Eine unbequeme Wahrheit*, München 2006, sowie die Internet-Hinweise unter <http://www.climatecrisis.net>
- [2] IPCC: Climate Change. Cambridge 2007. Wenn im Text nichts anderes erwähnt wird, ist der Teil „*Working Group I*“ aus dem 4. Bericht von 2007 (auch unter <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg-1.htm>) gemeint. Ansonsten:
- [2-1990] 1. Bericht mit dem „*Supplementary Report*“ von 1992.
- [2-1994] 2. Bericht (in der Verlagsankündigung: 1995).
- [2-2001] 3. Bericht, auch unter:
<http://www.ipcc.ch/ipccreports/assessment-reports.htm>
- [2-2007] 4. Bericht, auch unter <http://www.ipcc.ch>, mit zusätzlichen Materialien gegenüber der gedruckten Version.
- [3] DÖPEL, R., *Über die geophysikalische Schranke der industriellen Energieerzeugung*. Wiss. Zeitschrift TH Ilmenau 19 (1973) H. 2, S. 37-52.
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=12380>.
- [3a] Döpel, R. u. K., Heisenberg, W., *Der experimentelle Nachweis der effektiven Neutronenvermehrung in einem Kugel-Schichten-System aus D₂O und Uran-Metall* (Original 1942: <http://www.deutsches-museum.de/archiv/archiv-online/Geheimdokumente>); mit dem Jahr der Freigabe 1946 versehen in: Heisenberg, W., *Gesammelte Werke* Bd. A

- II (Hrsg. Blum, W., Dürr, H.-P., Rechenberg, H.), Berlin etc. (1989), S. 536-544.
- [4] Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung (Hrsg. L. Hiersemann); Folge 13. Hochsch. f. Technik, Wirtsch. u. Kultur (FH) Leipzig 1995. DARIN:
- [4-A] Kleint, C., *Leben und Wirken von Robert Döpel - Zum 100. Geburtstag von Robert Döpel*. S. 3-12.
- [4-B] Wadewitz, H. *Krieg und Studium - Erinnerungen an mein 1940 in Leipzig begonnenes Studium und an Robert und Klara Döpel*. S. 13-18. - *Robert Döpel in Briefen aus seiner Ilmenauer Zeit (1960-1982)*. S. 19-32.
- [4-C] Lehmann, D., *Döpels Arbeiten zur Atom- und Kernphysik*. S. 33-63.
- [4-D] Hantzsch, E., *Robert Döpels Arbeiten zur Gasentladungsphysik*. S. 64-73.
- [4-E] Hötzel, M., *Robert Döpel und die Politik*. S. 74-101.
- [4-F] Kleint, C., *Briefe Döpels zwischen 1945 und 1982*. S. 102-153.
- [4-G] Kleint, C., *Bibliographie der wissenschaftlichen Arbeiten von Robert Döpel*. S. 154-165.
- [5] Ludwig, K.-H., *Eine kurze Geschichte des Klimas. Von der Entstehung der Erde bis heute*. München 2006.
- [6] Flügge, S. (Hrsg.), *Handbuch der Physik XLVIII*, Berlin 1957: *Geophysik II*; darin Möller, F., *Strahlung in der unteren Atmosphäre*, S. 155-253.
- [7] Gassmann, F., *Was ist los mit dem Treibhaus Erde?* Zürich, Stuttgart, Leipzig 1993.

- [8] Wisniak, J., *Svante Arrhenius and the Greenhouse Effect*. Indian J. of Chem. Technology 9 (2002) S. 165-173.
- [9] Hupfer, P., Kuttler, W. (Hrsg.), *WITTERUNG UND KLIMA. Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie*. Stuttgart etc. 2005.
- [10a] <http://hadobs.metoffice.com/hadcrut3/diagnostics/global/nh+sh/>; s.a. Brohan, P. et al., *Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: a new dataset from 1850*. J. Geophys. Res. 111 (2006), D12106; doi: 10.1029/2005JD006548.
- [10b] <http://cdiac.ornl.gov/ftp/trends/co2/lawdome.smoothed.yr20> bis 1958, danach <http://scripsco2.ucsd.edu/home>; s.a. Keeling, C. D., et al., *Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000*. In: Ehleringer, J.R., et al. (eds.), *A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems*. New York 2005, p. 83-113
- [11] Meadows, D., et al., *Die Grenzen des Wachstums (Bericht an den Club of Rome zur Lage der Menschheit)*, Stuttgart 1972.
- [12] Mesarovic, M., Pestel, E., *Menschheit am Wendepunkt. 2. Bericht an den Club of Rome zur Weltlage*. Stuttgart 1974.
- [12a] Meadows, D., et al., *DIE NEUEN GRENZEN DES WACHSTUMS. Die Lage der Menschheit: Bedrohung und Zukunfts-Chancen*. Stuttgart 1992. - Dies.: *GRENZEN DES WACHSTUMS: Das 30-Jahre-Update. Signal zum Kurswechsel*. Stuttgart 2006. - Dazu: Interview von Dennis Meadows mit Susanne Schädlich im Bonner General-Anzeiger v. 4./5.10. 2008, S. 6.
- [13] Hänsel, Ch., *Geophysik und Umwelt*. Leipzig 1975. - *Klima-Änderungen: Erscheinungsformen und Ursachen*. Leipzig 1975.

- [13a] Frank, W., *Das Problem der globalen Energieversorgung*. In: Die Pugwash-Bewegung – Wissenschaftler für den Frieden (Hrsg.), Weltprobleme und Wissenschaft, Wien 1976, S. 65-89.
- [14] Arnold, H., *Chemisch-dynamische Prozesse in der Umwelt. Eine stoff- und populationsökologische Einführung*. Stuttgart u. Leipzig 1997. Weitgehend unverändert unter <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=11794> (2008).
- [15] (Anonym) *Ein Kühlschranks feiert Geburtstag*. Glocalist Daily News; Tageszeitung für CSR & Wirtschaftsethik. Hamburg 19.03.08. <http://www.glocalist.com>
- [16] Dameris, M., et al., *Das Ozonloch und seine Ursachen*. Chem. in uns. Zeit 41 (2007) S.152-168.
- [17] Velders, G. J. M., et al., *The Importance of the Montreal Protocol in Protecting Climate*. Proceedings Natl. Acad. Sci. 2007, 104 (12), S.4814-4819.
- [18] Wernicke, C., *Vom Präsidentschaftskandidaten zum Popstar: AL GORE, der Klima-Rocker*. Süddeutsche Zeitung 18.02.2007.
- [19] Pötter, B., In letzter Minute. Die Zeit (Hamburg) 6. 9. 2007 (Nr. 37), S. 92.
- [20] Weizsäcker, E. U. v., *Klima, Ressourcen und Krieg*. Blätter für deutsche und internationale Politik (Monatszeitschrift) 2008 H. 2, S. 45-54.
- [21] Maxeiner, D., Miersch, M., *LEXIKON DER ÖKO-IRRITÜMER: Überraschende Fakten zu Energie, Gentechnik, Gesundheit, Klima, Ozon, Wald und vielen anderen Umweltthemen*. Frankfurt 1998; Taschenbuch-Sonderausgabe 2002. - Aktualisierte Taschenbuchausgabe mit neuem

- Untertitel: *Fakten statt Umweltmythen*. München 2001. (Jeweils mit Nachauflagen.)
- [22] Easterbrook, G. *A Moment on the Earth. The coming age of Environmental Optimism*. New York 1995.
- [23] Lippold, W., (Kommissions-Vorsitz), *Klimaänderung gefährdet globale Entwicklung. Zukunft sichern – Jetzt handeln*. 1. Bericht der Enquete-Kommission „Schutz der Erdatmosphäre“. Bonn 1992.
- [24] Blum, W., Rebhahn, E., *Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990-2020. Eine Studie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*. Bad Honnef 2005. Broschüre, auch unter <http://www.dpg-physik.de>. Dazu der Diskussionsbericht: Pawlak, E., *Jahrhundertproblem Klima*. Physik Journal 5 (2006) Nr. 4, S. 5f., mit dem Leitartikel (S. 3): *Mehr Sicherheit nach Tschernobyl?*
- [25] Graßl, H., *Was stimmt? KLIMAWANDEL. Die wichtigsten Antworten*. Freiburg etc. 2007.
- [26] *Klima-Report*. GEO (Hamburg) 2007 H.12 S. 154-198; mit einem 32-Seiten-Beiheft „*Wer ist der Beste beim Klimaschutz?*“ im Bundesländer-Vergleich.
- [27] Lehmann, D., Kleint, Ch., *Das Leipziger Uranmaschinenprojekt - einer der Bausteine auf dem Wege zur technischen Anwendung der Kernenergie*. Beiträge zur Geschichte von Technik und technischer Bildung (Hrsg. L. Hiersemann); Folge 6, Hochsch. f. Technik, Wirtsch. u. Kultur (FH) Leipzig 1993, S. 3-141.
- [28] Hanle, W., Rechenberg, H., *1982: Jubiläumsjahr der Kernspaltungsfor-schung*. Physikalische Blätter 38 (1982) Nr. 12, S. 365-367.

- [29] Hiersemann, L., *Robert Döpel und das Leipziger Uranmaschinenprojekt*. Schriftenreihe „Traditionen der technischen Bildung in Leipzig“, H. 14. Leipzig 1994.
- [29a] Cassidy, D. C., *Werner Heisenberg: Leben und Werk*. Heidelberg etc. 1995. (Originaltitel: *Uncertainty. The Life and Science of Werner Heisenberg*. New York 1992.)
- [29b] Döpel, R. u. K., *Die Unterschreitung der spektralanalytischen Nachweisgrenze von Spurenelementen durch die Untersuchung der in ihnen erregten β -Strahlung*. Physikal. Zeitschr. 44 (1943), S. 261-269.
- [29c] Irving, D. J. C., *The Virus House*. London 1967. Deutsch: *Der Traum von der deutschen Atombombe*. Gütersloh 1967. Im Text unverändertes engl. Paperback: *The German Atomic Bomb: The History of Nuclear Research in Nazi Germany*. New York 1983.
- [29d] Jungk, Robert, *Heller als tausend Sonnen. Das Schicksal der deutschen Atomforscher*. Stuttgart 1956.
- [30] Heisenberg, W., *Das Naturbild Goethes und die technisch-wissenschaftliche Welt*. Gesammelte Werke Bd. A II (Hrsg. Blum, W., Dürr, H.-P., Rechenberg, H.), Berlin etc. (1989), Bd. C II, S. 394-409.
- [31] Personalakte Kad. 0634 *Prof. Dr. phil. habil. Robert Döpel* (2 Teile). Archiv der TU Ilmenau.
- [32] Hanle, W., *Robert Döpel 75 Jahre*. Physikalische Blätter 26 (1970) Nr. 12, S.573. - Ders.: *Nachruf auf Robert Döpel*. Physikalische Blätter 39 (1983) S. 104; - Ders.: *Memoiren*. Giessen 1989.
- [33] Klötzli, F. A., *ÖKOSYSTEME. Aufbau, Funktion, Störungen*. Stuttgart 1989.

- [34] IPCC Special Report on Emission Scenarios (SRES). Cambridge 2000 und www.ipcc.ch/ipccreports/sres/emission/index.htm .
- [35] Weltenergierat, Deutsches Nationalkomitee („DNK-Veröffentlichungen“): Kostenlose Download-Broschüre *Energie für Deutschland 2006*. <http://www.weltenergierat.de>
- [36] Special *Klima und Energie* der VDI-Gesellschaft Energietechnik, in: BWK - Das Energie-Fachmagazin 59 (2007) Nr. 10. Dazu die Studie (2008): *Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030* unter <http://www.EWI.uni-koeln.de>.
- [37] Nick, H., *Sozialismus und Wirtschaftswachstum*. Berlin (Ost) 1977.
- [38] Hansen, J., et al., *Efficacy of climate forcings*. J. Geophys. Res. 110 (2005), S. 1-45.
- [39] Puls, K.-E., *Unser Klima wird im All gemacht - Freispruch für CO₂*. CIVIS: Vierteljahresschrift für eine offene und solidarische Gesellschaft H. 1/2007, S. 8-17.
- [40] <http://www.mps.mpg.de>
- [41] Kuttler, W., Zmarsly, E., *Natürlicher und anthropogener Treibhauseffekt - Ursachen und Auswirkungen*. Petermanns Geographische Mitteilungen 144 (2000), S. 6-13.
- [42] Myhre, G., et al., *New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases*. Geophys. Research Letters 25 (1998), S. 2715-2718.
- [43] Kartschall, K., et al., *Klimaänderungen, deren Auswirkungen und was für den Umweltschutz zu tun ist*. Berlin 2007. Als kostenlose Download-Broschüre unter <http://www.uba.de>

- [44] Montoya, M., et al., *The earth system model of intermediate complexity CLIMBER-3&. Part I: Description and performance for present-day conditions*. Climate Dynamics 25 (2005), S. 237-263 u. 26 (2006), S. 327. (Part II zur Veröff. vorgesehen.)
- [45] Driesschaert, E., *Climate Change over the Next Millennia Using LOVECLIM, a New Earth System Model Including Polar Ice Sheets*. PhD Thesis, Louvain-la-Neuve, Belgien, 2005. Auch unter <http://edoc.bib.ucl.ac.be:81> .
- [46] Bossel, H., *SYSTEME, DYNAMIK, SIMULATION. Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*. Norderstedt 2004. Dazu *Systemzoo 1: Elementarsysteme, Technik und Physik; 2: Klima, Ökosysteme und Ressourcen; 3: Wirtschaft, Gesellschaft und globale Entwicklung*.
- [47] Gorbatschow, M., *Mein Manifest für die Erde*. Frankfurt/Main 2003.
- [48] Granin, D., *Das Jahrhundert der Angst. Erinnerungen*. Berlin 1999.
- [49] Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, *Kernfusion - Stand und Perspektiven*. Garching/Greifswald 2008. Auch unter <http://www.ipp.mpg.de>
- [50] Keuntje, M., *Asien macht den Weg zur Fusion frei*. Physik Journal 7 (2008) Nr. 8/9, S. 7.
- [51] Meller, E., *Energiewirtschaftliches Gesamtkonzept 2030*; in: [36], S. 10-12. Auch unter <http://www.strom.de>
- [52] Pistner, C., Küppers, C., *Analyse des Bedrohungspotenzials „gezielter Flugzeugabsturz“*. Darmstadt 2007. Auch unter <http://www.oeko.de/publikationen/dok/613.php>.

- [53] Knizia, K., *Der Thorium-Hochtemperaturreaktor THTR 300 - Eine vertane Chance?* Atw: Internat. Journal f. Nuclear Power 47 (2002), S. 110-117.
- [54] Klein, J., *Einige persönliche Erinnerungen an Professor Döpel.* Wiss. Zeitschrift TH Ilmenau 32 (1986) H. 1 S. 29-35.
- [55] Rechenberg, H., *Goethe hat ihn durch sein ganzes Leben begleitet. Werner Heisenbergs Auseinandersetzung mit Goethes Naturbild.* In: Goethe-Jahrbuch, Weimar 2003, S. 277-291. Dazu: Arnold, H., *Zwei Kulturen im Disput über das Goethebild moderner Naturwissenschaftler.* <http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=9690> (2007).
- [56] Gore, A., *Angriff auf die Vernunft.* München 2007.
- [57] Klaus, V., *BLAUER PLANET IN GRÜNEN FESSELN. Was ist bedroht: Klima oder Freiheit?* Wien 2007.
- [58] Behringer, W., *Eine Kulturgeschichte des Klimas. Von der Eiszeit bis zur globalen Erwärmung.* München 2007.
- [59] Leggewie, C., *Kulturelle Revolution.* Forschung & Lehre 2008 H. 8, S. 505.
Dazu <http://www.kulturwissenschaften.de/klimakultur>: *Soziale Folgen des globalen Klimawandels und kulturelle Voraussetzungen seiner Bewältigung* (2008).
- [60] Berg, F., in: Huber, B. (Hrsg.), *Humboldt neu denken.* Schriften der Hanns-Martin-Schleyer-Stiftung, Nr. 65, Köln 2005, S. 126.
- [61] Töpfer, K., *Umweltpolitik und Klimawandel - Bedrohung und Chancen in einer globalisierten Welt.* In: Leibrock, F. (Hrsg.), *Zukunft andenken. Weimarer Reden.* Weimar 2008. S. 19-38.

- [62] Küng, H., *Projekt Weltethos*. München 2006; s. a. <http://www.weltethos.org>.
- [63] Dohmen, C., *"Let's Make Money." Was macht die Bank mit unserem Geld?* Freiburg 2008.
- [64] Stiftung Karlheinz Böhm, <http://www.MenschenFuerMenschen.de>